

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ-TU OSTRAVA**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Experimentální zjišťování průrazné pevnosti vzduchu – vliv teploty a  
vlhkosti**

**Experimental analyses of breakdown strength of air – influence of  
temperature**

***Prehlásenie:***

„Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne a uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.“

***Pod'akovanie:***

*Na tomto mieste by som rád poďakoval Ing. Martinovi Markovi, Ph.D. za cenné rady a pripomienky, ktoré mi poskytol pri riešení tejto diplomovej práce. Taktiež by som rád poďakoval Katedre elektrických strojov a prístrojov, ktorá mi umožnila uskutočniť potrebné merania.*

V Ostrave dňa 7. 5. 2009

.....  
Bc. Blaha Emil

**Abstrakt:**

Táto diplomová práca sa zaoberá experimentálnym zisťovaním prieražnej pevnosti vzduchu. Teoretická časť obsahuje základné pojmy, týkajúce sa tejto problematiky. Praktická časť bola zameraná na experimentálne posúdenie veľkosti prieražného napätia, prieražnú pevnosť vzduchu na medených elektródach v konštantnej vzdialenosti (7 mm), pri rôznych teplotách a relatívnych vlhkostiach vzduchu, ktoré boli dosiahnuté pomocou klimatickej komory. V praktickej časti sú taktiež zhrnuté výsledky z jednotlivých meraní.

**Kľúčové slova:**

prieražné napätie, výboj, elektrická pevnosť, vzduch, plynné izolanty, elektródy, teplota, relatívna vlhkosť

**Abstract:**

This thesis deals with an experimental findings of the breakdown of the strength of the air. The theoretical section provides basic definitions relating to this issue. The practical part was focused on the experimental assessment of the size of the piercing tension, piercing strength of the air on the copper electrodes in constant distance of (7 mm) in different temperatures and relative moisture of air that has been achieved in climatic chamber. In practical part is summarizes the results of individual measurements.

**Key words:**

breakdown voltage, discharge, electric strength, air, gaseous insulators, electrodes, temperature, relative moisture

**Zoznam niektorých použitých symbolov a značiek:**

<i>symbol</i>	<i>názov</i>	<i>jednotka</i>
$A$	Maximálna vlhkosť vzduchu	(g.m <sup>-3</sup> )
$E$	Intenzita elektrického poľa	(V\m)
$Ep$	Elektrická pevnosť	(kV)
$I$	Elektrický prúd	(A)
$R$	Plynová konštanta	(8,316 J . mol <sup>-1</sup> . deg <sup>-1</sup> )
$T$	Teplota	(°C)
$U$	Elektrické napätie	(V)
$Up$	Prierazné napätie	(kV)
$V$	Objem vzduchu	(m <sup>3</sup> )
$a$	Absolútna vlhkosť vzduchu	(g.m <sup>-3</sup> )
$d$	Sýtosťný doplnok	(Pa)
$e_0$	Napätie nasýtenia vodných pár	(Pa)
$e$	Skutočné napätie nasýtenia vodných pár	(Pa)
$h$	Planckova konštanta	(6,626 . 10 <sup>-34</sup> J.s)
$q$	Špecifická vlhkosť vzduchu	(g.kg <sup>-1</sup> )
$m$	Hmotnosť vodnej pary	(g)
$p$	Tlak plynu	(Pa)
$t_r$	Teplota rosného bodu	(°C)
$v$	Rýchlosť ionizujúcej častice	(m . s <sup>-1</sup> )
$\Theta$	Absolútna teplota	(°K)
$\epsilon_r$	Permitivita vzduchu	(-)
$\varphi$	Relatívna vlhkosť vzduchu	(-)
$\mu_0$	Permeabilita vákua	(4. $\pi$ .10 <sup>-7</sup> )
$\mu_r$	Relatívna permeabilita	(-)

# OBSAH

Úvod: .....	1
<b>1. VLASTNOSTI ELEKTROTECHNICKÝCH IZOLANTOV.....</b>	<b>2</b>
<b>2. VLASTNOSTI PLYNNÝCH IZOLANTOV .....</b>	<b>3</b>
2.1. FYZIKÁLNA PODSTATA ELEKTR. PRIERAZU PLYNOV .....	4
2.2. IÓNIZÁCIA PLYNOV ÚČINKOM VONKAJŠÍCH IÓNIZÁTOROV .....	5
2.2.1. Zánik ionizovaných častí plynu.....	6
2.2.2. Pohyblivosť častíc v plyne, ktorý je v elektrickom poli.....	7
2.3. DIELEKTRICKÉ STRATY V PLYNOCH.....	9
<b>3. ELEKTRICKÁ PEVNOSŤ PLYNNÝCH IZOLANTOV .....</b>	<b>10</b>
3.1. V HOMOGÉNNOM ELEKTRICKOM POLI.....	10
3.2. V NEHOMOGÉNNOM ELEKTRICKOM POLI.....	11
3.3. ELEKTRICKÁ PEVNOSŤ VZDUCHU .....	11
3.4. ELEKTRICKÁ PEVNOSŤ VÁKUA.....	14
3.4.1. Vedenie elektrického prúdu vo vákuu .....	15
3.5. ELEKTRICKÉ VÝBOJE .....	16
3.5.1. Samostatný elektrický výboj .....	16
<b>4. VZDUCH.....</b>	<b>18</b>
4.1. ZLOŽENIE VZDUCHU .....	18
4.2. ZÁKLADNÉ FYZIKÁLNE VLASTNOSTI VZDUCHU.....	19
4.3. VLHKOSŤ VZDUCHU .....	19
4.3.1. Fyzikálne veličiny a jednotky vlhkého vzduchu .....	20
4.3.2. Základné princípy merania vlhkosti vzduchu.....	21
4.3.3. Prehľad metód a prístrojov na meranie vlhkosti vzduchu .....	22
4.3.3.1. Elektrická metóda merania vlhkosti vzduchu .....	22
4.3.3.2. Psychometrická metóda merania vlhkosti vzduchu .....	22
4.3.3.3. Hygroskopická metóda merania vlhkosti vzduchu .....	23
4.4. Základné princípy merania teploty .....	24
4.5. Metódy a prístroje na meranie teploty vzduchu .....	25
4.5.1. Teplomery kvapalinové sklené.....	25
Elektrické teplomery .....	26
4.5.2. Teplomery deformačné.....	28
4.5.3. Bezkontaktné teplomery - infratermometre.....	29
<b>5. VLASTNÁ EXPERIMENTÁLNA ČASŤ PRÁCE .....</b>	<b>30</b>
5.1 Použité prístroje:.....	32
5.2. Postup merania .....	35

5.3. Hodnoty prieraz. napätia pri teplotách s možnosťou regulácie vlhkosti: .....	37
<b>5.3.1. Vzájomne porovnanie výsledkov pri teplotách s možnosťou regulácie vlhkosti.</b> .....	40
5.4. Hodnoty prierazného napätia pri teplotách bez možnosti regulácie vlhkosti: .....	42
<b>5.4.1. Vzájomne porovnanie výsledkov pri teplotách bez možnosti regulácie vlhkosti.</b> .....	44
5.5.    Zaujímavosti .....	46
<b>Záver:</b> .....	47
<b>Použitá literatúra:</b> .....	48

## Úvod:

Cieľom tejto diplomovej práce je experimentálne zisťovanie prieražnej pevnosti vzduchu. Práca je rozdelená do 2 hlavných častí a to na teoretickú a vlastnú experimentálnu časť.

Teoretická časť, je zameraná na objasnenie problematiky, ktorá súvisí s touto tematikou a to napr. vlastnosti izolantov používaných v elektrotechnike, vysvetlenie elektrickej pevnosti plynov v poliach, fyzikálnu podstatu elektrického výboja v plynach atď.

V druhej časti diplomovej práce, sa nachádza praktická časť s vlastným meraním, ktorej cieľom je, experimentálne posúdiť veľkosť prieražného napätia vzduchu, na medených elektródach, vo vzdialenosti 7 mm, pri rôznych teplotách a vlhkostiach vzduchu. Vlastné experimentálne meranie je rozdelené do dvoch základných skupín.

Meranie 1) pri teplotách, u ktorých je možné priamo regulovať a merať relatívnu vlhkosť vzduchu. To sú teploty v rozmedzí 10 až 95 °C.

Meranie 2) pri teplotách, u ktorých nie je možné priamo regulovať a merať relatívnu vlhkosť vzduchu. To sú teploty pod 10 °C.

# 1. VLASTNOSTI ELEKTROTECHNICKÝCH IZOLANTOV

Všetky technické materiály delíme na vodiče, polovodiče a izolanty. Delíme ich tak podľa toho, či obsahujú alebo neobsahujú voľné elektrické náboje, a v akom množstve voľné náboje obsahujú. Delenie materiálov na vodiče, polovodiče a izolanty podľa veľkosti mernej elektrickej vodivosti, závisí od obsahu voľných nábojov v materiáli, pretože merná elektrická vodivosť je úmerná koncentrácii a pohyblivosti voľných nábojov. Ak materiál obsahuje voľné elektrické náboje v dostatočnom množstve je vodičom. Ak materiál voľné elektrické náboje neobsahuje, alebo ich obsahuje len v malom množstve je izolantom. Ideálny izolant neobsahuje žiadne voľné náboje a jeho merný elektrický odpor je nekonečne veľký. Každý reálny izolant však obsahuje malé množstvo voľných nábojov, a preto je jeho merný elektrický odpor konečný.

V izolantoch sa len málokedy vyskytujú voľné elektróny a elektrónová vodivosť. Vo väčšine izolantov, pri bežných podmienkach, sa vyskytuje iónová vodivosť spôsobená pohybom voľných iónov.

V plyne sú všetky molekuly elektricky neutrálne, pokiaľ nie sú niektoré z nich rozbité na ióny a elektróny účinkom vonkajších ionizačných činiteľov, alebo nárazovou ionizáciou v elektrickom poli.

Možno povedať, že každý elektroizolačný materiál sa skladá takmer výlučne z elektricky viazaných nábojov a obsahuje nepatrné množstvo voľných elektrických nábojov. Keď materiál vložíme do elektrického poľa, pohybujú sa v ňom voľné aj viazané elektrické náboje. Zásadný rozdiel je v tom, akým spôsobom sa pohybujú voľné náboje a náboje viazané. Z toho dôvodu sa ich pohyb navonok prejavuje v rôznych vlastnostiach materiálu. Pohyb voľných nábojov vo vonkajšom elektrickom obvode materiálu sa prejaví ako elektrická vodivosť. Pohyb viazaných nábojov v izolačnom materiáli sa prejaví vo vonkajšom elektrickom obvode v nahromadení náboja na elektródach a prejavujú sa ako polarizácia izolantu.

Pri jednosmernom, ako aj pri striedavom napätí sa pohyb viazaných nábojov v izolante prejavuje navonok ako dielektrická polarizácia izolantu a pohyb voľných nábojov ako jeho elektrická vodivosť. [2]



## 2. VLASTNOSTI PLYNNÝCH IZOLANTOV

Zo všetkých druhov izolantov majú najnižšiu permitivitu plyny. Ich permitivita má takú malú elektrickú vodivosť, s takými malými dielektrickými stratami, že ich väčšinou možno považovať za zanedbateľne. Tieto vlastnosti súvisia s nízkou hustotou plynov, ktorá je však zároveň príčinou relatívne nízkych hodnôt elektrickej pevnosti. Plyné izolanty majú stále vlastnosti, ktoré pri pôsobení prevádzkových podmienok nepodliehajú starnutiu. Elektrická pevnosť plynov sa po prieraze obnovuje. S rastúcim tlakom ich elektrická pevnosť stúpa, čo sa aj prakticky využíva pri ich použití ako izolantov na vysoké napätie. Elektrická pevnosť plynov okrem tlaku závisí aj na vlhkosti, teplote a vzdialenosti medzi elektródami (Paschenov zákon). V silne nehomogénnom poli, úplnému prierazu predchádzajú čiastočne výboje. Jedným typom týchto výbojov je aj korona, ktorá vzniká pri povrchu vodičov na vysokom napätí.

Plyny sú dobrými izolantmi, až kým intenzita elektrického poľa neprekročí hranicu, pri ktorej začína v plyne nárazová ionizácia. Elektrická vodivosť plynov je až po túto hranicu podstatne menšia ako elektrická vodivosť väčšiny tekutých a pevných izolantov.

Elektrický prúd sa v plyne prenáša pohybom kladne a záporne nabitých iónov a elektrónov v elektrickom poli. Kladne nabité ióny a elektróny vznikajú v plyne ionizáciou neutrálnych molekúl. To znamená odtrhnutím elektrónov z neutrálnych molekúl. Záporné ióny vznikajú spojením voľných elektrónov s neutrálnymi molekulami plynu. Ionizácia môže vznikáť nárazmi elektrónov a iónov na neutrálne molekuly, alebo účinkom krátkovlnného elektromagnetického žiarenia.

V plyne rozlišujeme samostatnú a nesamostatnú vodivosť. K ionizácii v slabom elektrickom poli dochádza len vplyvom vonkajších faktorov (ionizátorov). Ionizátory môžu byť rôzne žiarenia (röntgenové, ultrafialové, kozmické, rádioaktívne), ako aj vplyv vysokej teploty plynu. *Nesamostatnú vodivosť* plynu vytvárajú elektricky nabité častice, ktoré vznikajú účinkom vonkajších faktorov. Ak intenzita elektrického poľa prekročí určitú hodnotu, vzniká nárazová ionizácia. Pri nej sa neutrálne molekuly rozpadajú nárazom elektricky nabitých častíc pohybujúcich sa v elektrickom poli na kladné ióny a elektróny. *Samostatná vodivosť plynov* úzko súvisí s prierazom plynov, pretože nárazová ionizácia vzniká účinkom elektrického poľa.

Častice plynu sú v priestore riedko rozptýlené a sú voľne pohyblivé. Plyn sa všeobecne snaží zabráť čo najväčší objem a tým, že je uzatvorený v nádobe vytvára na jej steny tlak. V zmesi plynu sa celkový tlak rovná súčtu tlakov jednotlivých zložiek.

Pri predpoklade ideálneho plynu, u ktorého medzi molekulami nepôsobia žiadne príťažlivé sily a molekuly nezaberajú žiadny objem, platí, že súčin objemu  $V$  a tlaku plynu  $p$  je daný stavovou rovnicou.

$$p \cdot V = R \cdot \Theta \quad (1)$$

kde:  $R$  - plynová konštanta ( $R = 8,316 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{deg}^{-1}$ )

$\Theta$  - absolútna teplota ( $^{\circ}\text{K}$ )

Pre reálne plyny, v ktorých rešpektujeme príťažlivé sily medzi molekulami a objem, ktorý molekuly plynu vyplňujú, platí stavová rovnica Van der Walsova.

$$(p + p_0) \cdot (V - v) = R \cdot \Theta \quad (2)$$

kde:  $p_0$  - vnútorný tlak plynu vzniknutý príťažlivými silami medzi molekulami

$v$  - objem samostatných molekúl plynu

Všetky plyny vrátane niekoľkých neionizovaných kovov sú nevodivé. Ako izolanty sa však používajú len niektoré a to tie, ktoré vyhovujú chemickými vlastnosťami i tepelnou vodivosťou.

Plynné izolanty sa používajú tam, kde sa nevyskytujú vysoké elektrické namáhania, kde sa požadujú malé dielektrické straty a nevyžaduje sa veľká kapacita. Ako izolanty sa využívajú plyny, ktoré sú chemicky stále a nevýbušné. Pri zvyšovaní intenzity elektrického poľa sa musí počítať s hranicou, pri ktorej nastáva samostatný výboj použitého plynu. Pri zvyšovaní tlaku plynu sa podstatne zvyšuje elektrická pevnosť. Zvýšená teplota znižuje elektrickú pevnosť, ale plyn sa stáva vodivým až pri teplotách okolo 2000 °C. [1,2]

## 2.1. FYZIKÁLNA PODSTATA ELEKTR. PRIERAZU PLYNOV

Fyzikálnou podstatou prierazu plynu je nárazová ionizácia a fotoionizácia. Každý plyn obsahuje malé množstvo elektricky nabitých častíc (kladných a záporných iónov a elektrónov).

Ak plyn nie je v elektrickom poli, elektricky nabité častice sa pohybujú tepelným pohybom, to znamená rovnakým spôsobom, ako častice bez elektrického náboja. Ióny majú prakticky rovnakú hmotnosť ako molekuly bez elektrického náboja, preto je aj ich rýchlosť pohybu rovnaká. Elektróny majú podstatne menšiu hmotnosť, preto sa pri rovnakej kinetickej energii pohybujú oveľa rýchlejšie. Tepelná rovnováha v plyne nastáva ak majú elektróny rovnakú kinetickú energiu.

Keď je plyn v elektrickom poli, sú elektricky nabité častice urýchľované a to kladné v smere elektrického poľa a záporné proti nemu. Na tepelný pohyb, ktorý sa vyznačuje rovnomernou rýchlosťou medzi zrážkami a zmenou smeru a rýchlosti pohybu pri zrážkach sa superponuje rovnomerne zrýchlený pohyb v smere (proti smeru) poľa. Pri zrážkach elektricky nabitá častica stráca väčšinu získanej energie, takže rýchlosť pohybu v smere poľa nevzrastá ako pri rovnomerne zrýchlenom pohybe, ale je na dlhšej dráhe v priemere takmer rovnomerná. Dráha pohybu sa skladá z malých oblúkov.

## 2.2. IÓNIZÁCIA PLYNOV ÚČINKOM VONKAJŠÍCH IÓNIZÁTOROV

Prechod elektrónu na akúkoľvek dráhu vzdialenejšiu od jadra sa prejaví zväčšením energie atómu. Toto sa môže uskutočniť len pôsobením vonkajšieho zdroja energie, ktorý atómu dodá potrebné množstvo energie. *Vzbudený atóm* je atóm, ktorého vonkajší elektrón je premiestnený na vzdialenejšiu dráhu. *Budiaca energia* je taká energia, ktorá je potrebná na vzbudenie atómu a je tým väčšia, čím vzdialenejšia je od jadra dráha, na ktorú elektrón prechádza. Elektrón sa stáva voľným, ak sa vzdiali od jadra natoľko, že prakticky prestane vzájomné pôsobenie medzi ním a jadrom. Vtedy nastáva ionizácia atómu a ten sa rozpadá na dve navzájom nezávislé častice (elektrón a kladný ión). Na ionizáciu neutrálneho atómu je potrebná *ionizačná energia*  $W$ , ktorú musíme dodať zo zdroja.

Energia potrebná na budenie ionizovaného atómu je väčšia, ako energia potrebná na budenie neutrálneho atómu.

Opačným procesom ako vzbudenie je prechod elektrónu zo vzdialenejšej dráhy na bližšiu dráhu k jadrú. Pri tomto procese sa uvoľňuje energia, ktorá sa rovná rozdielu hladín energie, vzbudenej a normálnej dráhy. Energia sa uvoľňuje ako žiarenie s frekvenciou, ktorá je daná rovnicou

$$E = h \cdot \nu \quad (3)$$

kde  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  J.s čo je Planckova konštanta.

*Rezonančná hladina* je najbližšia hladina energie k normálnej hladine neutrálneho atómu a *rezonančné žiarenie* je žiarenie vysielané pri návrate elektrónu z rezonančnej hladiny na normálnu hladinu. Fotón uvoľnený pri rezonančnom žiarení môže odovzdať celú svoju energiu inému atómu a priviesť ho tým do vzbudeného stavu. Tento prechod vzbudeného stavu medzi atómami sa nazýva *difúziou rezonančného budenia*.

Hladiny energie, z ktorých elektrón nemôže prejsť samovoľne na najbližšiu dráhu k jadrú, vyžiaréním získanej potenciálnej energie sa nazývajú *metastabilnými hladinami*.

Pri metastabilnom stave môže prechod do normálneho stavu prebiehať len tak, že elektrón prejde na niektorú vyššiu hladinu energie a z nej sa potom môže samovoľne vrátiť na normálnu hladinu. Prechod z metastabilného stavu do normálneho je možný len pri pôsobení vonkajšieho zdroja energie, čo určuje trvanie metastabilných stavov. Metastabilné stavy sú najvýraznejšie vo vzácnych plynch a sú dôležité pri výbojoch v plynch. Vyskytujú sa napríklad aj v parách ortuti.

Podľa jednej novšej teórie, predpokladajúcej vlnovú povahu elektrónu, je možný samovoľný prechod z metastabilného stavu do normálneho stavu, a však pravdepodobnosť takéhoto prechodu je veľmi malá a prechod môže nastať len po dlhšom čase.

### 2.2.1. ZÁNİK IONIZOVANÝCH ČASTÍ PLYNU

Ak plyn nie je v elektrickom poli, zanikajú ionizované častice rekombináciou, ak sa plyn nachádza v elektrickom poli, ionizované častice zanikajú buď rekombináciou, alebo na elektródach.

Zánik elektricky nabitých častíc pri vzájomných zrážkach kladne nabitej častice so záporne nabitou časticou nazývame *rekombináciou*. O *iónovej rekombinácii* hovoríme, ak pri zrážke kladného iónu so záporným prejde elektrón zo záporného iónu na kladný a vzniknú dve neutrálne molekuly. Pri *iónovej rekombinácii* sa uvoľní energia, ktorá je rovnaká ako ionizačná energia molekuly vzniknutej z kladného iónu a spotrebuje sa energia rovná afinite elektrónu molekuly, ktorá vznikla zo záporného iónu. Prejavuje zväčšením kinetickej energie vzniknutých neutrálnych molekúl a môže sa uvoľniť aj vo forme žiarenia.

O *elektrónovej rekombinácii* hovoríme, ak pri zrážke kladného iónu s elektrónom vznikne neutrálna molekula. Táto molekula zvyčajne preberá kinetickú energiu kladného iónu, z ktorého vznikla. Keďže elektróny majú rôznu rýchlosť, vzniká pri rekombinácii spojité spektrum žiarenia. Najmenšiu frekvenciu tohto žiarenia určuje ionizačná energia.

*Trojfáz* je ďalším druhom rekombinácie. Na tomto druhu rekombinácie sa zúčastňuje elektrón, kladný ión a neutrálna molekula. Aby nastala rekombinácia, to znamená, aby sa v kladnom ióne vyplnilo voľné miesto po elektróne, musia byť rekombinujúce častice určitý čas v bezprostrednej blízkosti. Takže, čím väčšiu majú rýchlosť elektricky nabité častice, tým menšia je pravdepodobnosť rekombinácie.

Keďže v elektrickom poli sa elektróny pohybujú oveľa rýchlejšie ako ióny, je pravdepodobnosť elektrónovej rekombinácie oveľa menšia, ako pravdepodobnosť iónovej rekombinácie. U elektrónov väčšinou prebieha nepriama rekombinácia, to znamená, že najprv vytvárajú záporné ióny. U iónov prebieha rekombinácia tým intenzívnejšie, čím väčšia je ich koncentrácia.

Hodnota koeficientu rekombinácie nie je konštantnou, ale mení sa s časom. Hneď po prerušení ionizácie, prebieha rekombinácia intenzívnejšie. A to preto, že hneď po prerušení ionizácie nestratili ešte elektróny celkom väzbu s iónmi, takže vzdialenosti medzi nimi sú ešte malé a elektrón sa môže ľahko vrátiť na dráhu svojho iónu. Neskôr sa tieto častice navzájom vzdávajú a rekombinácia prebieha menej intenzívne. Zánik elektrických nábojov ionizovaných častíc prebieha aj na elektródach.

Pri dopade voľného elektrónu plynu na anódu, vstupuje elektrón do kovu a pokračuje vodičom ku kladnému pólu zdroja. Energia, uvoľnená pri tomto jave, je daná súčtom kinetickej energie elektrónu a výstupnej práce kovu. Prejavuje sa najmä ako teplo a žiarenie.

Kladný ión sa pri dopade na katódu neutralizuje jedným elektrónom katódy. Takto vznikne neutrálna molekula, ktorá sa vracia do priestoru medzi elektródami. Uvoľnená energia na katóde je daná súčtom kinetickej energie iónu a ionizačnej energie. Od tejto hodnoty treba odčítať výstupnú prácu elektrónu. Táto energia sa môže prejaviť ako teplo.

K ďalším stratám elektricky nabitých častíc dochádza na stenách kovových a nekovových predmetov, s ktorými sa stretnú nabité častice pri svojom pohybe. V prípade kovových stien, sú k nim nabité častice priťahované vplyvom zrkadlovej sily, ktorá je vytvorená indukovaným nábojom. V prípade steny z nekovu, sa dopadajúca častica drží na povrchu tak dlho, kým sa v okolí neobjaví opačne nabitá častica a nenastane rekombinácia. Rýchle nabité častice sa od izolačnej steny odrážajú a vracajú sa späť do plynu. Pomalé nabité častice zostanú na stene a nabíjajú ju na odpovedajúcu polaritu, čím sa priťahujú náboje opačného znamienka a pôvodný náboj neutralizujú.

## 2.2.2. POHYBLIVOSŤ ČASTÍC V PLYNE, KTORÝ JE V ELEKTRICKOM POLI

Pohyblivosť iónov v plyne možno zistiť zo závislosti strednej rýchlosti pohybu iónov od intenzity elektrického poľa. Plynné elektróny a ióny, ktoré sú v elektrickom poli, sa pohybujú okrem svojho tepelného pohybu aj pohybom v smere, prípadne proti smeru vektora intenzity elektrického poľa.

Ak na elektróny a ióny v plyne pôsobí elektrické pole, pridá sa k tepelnému pohybu ešte rovnomerne zrýchlený pohyb v smere elektrického poľa a vznikne prídavný pohyb častice.

Elektricky nabité častice sa zrážajú s neutrálnymi molekulami plynu a pohybujú sa z pravidla rovnakým tepelným pohybom ako neutrálne častice. V čase medzi dvoma zrážkami vyvoláva elektrické pole konštantné zrýchlenie v jednom smere, preto sa dráha častice skladá z parabol. Pre odvodenie zákonnosti pohybu iónu v elektrickom poli predpokladáme, že pri každej zrážke s neutrálnou molekulou, ión odovzdá všetku svoju kinetickú energiu získanú urýchlením v elektrickom poli. To znamená, že je po každej zrážke rýchlosť pohybu iónu v smere elektrického poľa nulová. V prípade malej intenzity poľa  $E$ , sa rýchlosť iónu líši od rýchlosti neutrálnej molekuly len nepatrne, takže tento rozdiel môžeme zanedbať. Pre zrýchlenie iónu v elektrickom poli platí

$$a = q \cdot E / m \quad (4)$$

kde:  $m$  - hmotnosť iónu

$q$  - náboj iónu

$E$  - intenzita elektrického poľa.

Pre strednú rýchlosť v smere poľa v čase od zrážky po zrážku platí:

$$v = qE^*/2mc. \quad (5)$$

Stredná rýchlosť iónu na dráhe medzi dvoma zrážkami je geometrickým súčtom rýchlostí získanej urýchlením v elektrickom poli a rýchlosti tepelného pohybu.

Rovnako pravdepodobné sú všetky smery tepelného pohybu iónu. Pri výpočte strednej hodnoty rýchlosti v smere elektrického poľa je preto výsledná stredná hodnota tepelnej zložky pohybu iónov nulová. Pohyb v smere poľa je daný len tou zložkou pohybu, ktorá vzniká účinkom poľa.

Stredná rýchlosť iónov v smere poľa, účinkom elektrického poľa, je priamo úmerná intenzite elektrického poľa, ak stredná voľná dráha(\*) a rýchlosť tepelného pohybu (c) sú konštantné.

Pre pohyblivosť (rýchlosť v jednotkovom elektrickom poli) platí:

$$u = v/E = g^*/2mc \quad (6)$$

Druhý vzorec je približný, pretože stredná voľná dráha (\*) je určená bez síl vzájomného pôsobenia iónov s molekulami. Vzorec umožňuje aspoň približný výpočet pohyblivosti iónov a vyplýva z neho, že pohyblivosť sa znižuje so zväčšením molekulovej hmotnosti.

Tab.č.1: Experimentálne hodnoty pohyblivosti kladných a záporných iónov pre rozličné plyny

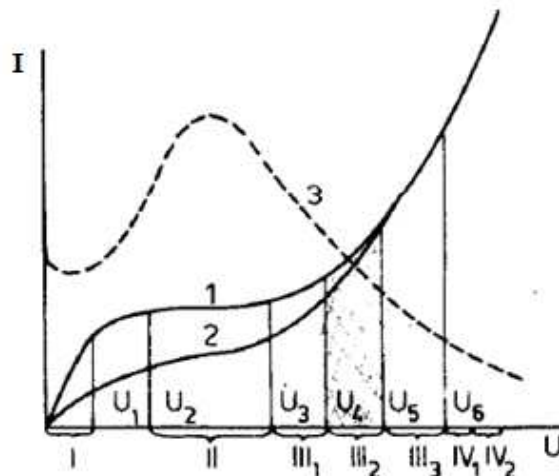
Plyn	u+	u-
Chlór	1,65	0,5
Argón	1,37	1,7
Vodík	6	8
Kyslík	1,3	1,8
Dusík	1,27	1,84
Pary vody	0,62	0,56
Hélium	5	6,3

V inertných plynoch je vznik záporných iónov najmenej pravdepodobný, a to kvôli plnému obsadeniu ich vonkajších elektrónových obalov. Ak sa inertný plyn očistíme dôkladne od prímies (môžu tvoriť záporné ióny), pohyblivosť záporných častíc veľmi vzrastie.

Doteraz sme predpokladali, že priemerná doba medzi dvoma zrážkami iónov mimo elektrického poľa rovnaká ako v ňom. Toto však platí len v slabých elektrických poliach. V silných elektrických poliach už nie je zanedbateľná rýchlosť od elektrického poľa oproti rýchlosti tepelného pohybu. Priemerná doba medzi dvoma zrážkami je kratšia ako bez elektrického poľa.

Z toho dôvodu rýchlosť iónov rastie v silnom elektrickom poli pomalšie a nepriamoúmerne s intenzitou elektrického poľa. Takže sa pohyblivosť znižuje. Výraznejšie rozdiely sa prejavujú len v blízkosti prierazu.

Koncentrácia nosičov náboja nezávisí v slabých elektrických poliach od napätia. Toto potvrdzuje aj platnosť Ohmovho zákona. *Nasýteným prúdom* nazývame prúd ktorý nezávisí od napätia. Súhrnne môžeme povedať: závislosť prúdu v plyne od napätia prebieha podľa *obr.č.1*.



Obr.č.1: Závislosť prúdu v plyne od napätia

- I.** úsek Ohmovho zákona – vzniká len ionizácia
- II.** úsek nasýteného prúdu – vzniknutá ionizácia vyvolaná vonkajším zdrojom žiarenia
- III.** v tomto úseku pribúda ionizácia spôsobená nárazom iónov na atómy a molekuly v elektrickom poli
  - III1 úsek úplnej proporcionality
  - III2 úsek čiastočnej proporcionality
  - III3 Geigerova oblasť
- IV.** oblasť samostatného výboje v plynach
  - IV1 úsek korónového výboja
  - IV2 úsek iskrového výboja

V oblasti platnosti Ohmovho zákona ióny vznikajúce účinkom vonkajších ionizátorov zanikajú rekombináciou. Ich koncentrácia nezávisí od napätia, preto je prúd úmerný napätiu.

V oblasti nasýteného prúdu účinkom vonkajších ionizátorov ióny vnikajú a zanikajú neutralizáciou na elektródach. Čím vyššie je napätie, tým nižšia je koncentrácia iónov, prúd je od napätia nezávislý a merný odpor rastie s napätím. Prúd je úmerný vzdialenosti medzi elektródami. Čím väčšia je vzdialenosť medzi elektródami tým väčší je prúd. Pre vzduch je hranica medzi oblasťou nasýteného prúdu a oblasťou platnosti Ohmovho zákona pri hodnote sily elektrického poľa približne 0,006 V/cm. Pri intenzite elektrického poľa rádovo 10 kV/cm začína nárazová ionizácia.

## 2.3. DIELEKTRICKÉ STRATY V PLYNOCH

Všetky plyny, dokonca aj pary kovov sú izolantmi. Malá časť molekúl, sa ionizuje účinkom vonkajších ionizačných činiteľov (kozmičné žiarenie, rádioaktívne žiarenie a pod.). Pri ionizácii sa molekula rozpadá na kladný ión a elektrón. Záporný ión sa vytvorí pri nízkej koncentrácii ionizovaných častíc, pri niektorej z prvých zrážok elektrónu s neutrálnou časticou. Za normálnych podmienok sú teda voľnými elektrickými nábojmi v plyne kladné ióny, záporné ióny a nepatrné množstvo elektrónov. Ich koncentrácia v plyne je veľmi nízka.

Po prekročení ionizačného napätia sa však koncentrácia voľných nábojov rýchlo zvyšuje. Elektróny, kladne nabité jadrá v atómoch a v molekulách a náboje dipólov sú viazanými nábojmi.

Tieto voľné a viazané elektrické náboje sa pohybujú v elektrickom poli a pri jeho zmenách. Pri jednosmernom aj pri striedavom napätí je spojený pohyb voľných nábojov s premenou elektrickej energie na teplo. Pohyb viazaných nábojov v plynných izolantoch prakticky neovplyvňuje dielektrické straty. Výnimku tvoria rezonančná polarizácia a veľmi vysoké frekvencie. Bezstratová je vo všetkých skupenstvách elektrónová polarizácia.

Dipólová polarizácia je spojená s dielektrickými stratami v kvapalných a tuhých izolantoch, avšak v plynnom skupenstve sú ňou spôsobené dielektrické straty zanedbateľné. Následkom ionizácie je zvyšovanie koncentrácie voľných nábojov a prejaví sa zväčšovaní dielektrických strát. Tieto dielektrické straty nazývame ionizačnými stratami.

Keďže je polarizačná zložka dielektrických strát v plynch zanedbateľná, majú až do ionizačného napätia praktický význam len vodivostné straty. Nad ionizačným napätím sú to straty vodivostné a ionizačné, a pri veľmi vysokých frekvenciách straty rezonančné.

Ionizačné straty vznikajú pri vysokých napätiach a nehomogénnom poli, keď sila elektrického poľa v niektorých miestach prekročí určitú kritickú hodnotu, pri ktorej začína ionizácia a molekuly plynu sa ionizujú. Vyše tohto napätia hodnota stratového činiteľa, ktorá je až po ionizačné napätie zanedbateľne malá, podstatne vzrastá.

Ak je v novej izolácii nízke ionizačné napätie, svedčí to o nesprávnej technológii výroby izolácie. Znakom starnutia izolácie je znižovanie ionizačného napätia počas používania izolácie, ako aj ďalšie zmeny v ionizačnej krivke.

Viac informácií viď. [2,6,7,8]

### **3. ELEKTRICKÁ PEVNOSŤ PLYNNÝCH IZOLANTOV**

#### **3.1. V HOMOGÉNNOM ELEKTRICKOM POLI**

Homogénne elektrické pole sa nachádza pri malej vzájomnej vzdialenosti medzi guľovými elektródami veľkého priemeru, taktiež aj medzi plochými elektródami so zaokrúhlenými okrajmi. Prieraz vzniká v homogénnom poli takmer okamžite po dosiahnutí napätia určitej hodnoty, závislej od teploty, vlhkosti a tlaku plynu. Pri prieraze vznikne medzi elektródami iskra a ak má zdroj napätia dostatočný výkon, prechádza iskra do elektrického oblúku. Pri známej vzdialenosti medzi elektródami sa môže vznik iskry použiť na určenie veľkosti priloženého napätia. Pomocou guľového iskršťa môžeme s veľmi dobrou reprodukovateľnosťou výsledkov merať vysoké napätie.

Elektrická pevnosť plynu pri konštantnej teplote veľmi závisí od tlaku (od hustoty) plynu. Hustota plynu vzrastá spolu so stúpaním tlaku. Elektrická pevnosť pri nezmenenej vzdialenosti medzi elektródami sa znižuje pri znižovaní tlaku. Hodnoty najmenších prierazných pevností pre rôzne plyny je v rozmedzí od 280 V do 420 V. Najmenšia hodnota pre vzduch je asi 300 V. [2]



### 3.2. V NEHOMOGENNOM ELEKTRICKOM POLI

Nehomogénne pole vzniká medzi guľovými elektródami pri vzdialenostiach prevyšujúcich polomer gule, medzi drôťmi elektrických vedení, medzi hrotom a doskou, medzi dvoma hrotmi, ďalej medzi drôťmi alebo elektródami antén vysieláčov, atď.

V miestach, kde intenzita poľa dosahuje alebo prevyšuje elektrickú pevnosť plynu, môže vzniknúť čiastočný výboj nazývaný "koróna". Pri ďalšom zvyšovaní napätia prechádza koróna na iskrový výboj a oblúk.

Kladné ióny a elektróny vznikajú nárazovou ionizáciou v miestach najsilnejšieho elektrického poľa (na hrote). V prípade kladného hrotu, zosilňujú elektrické pole pomerne málo pohyblivé kladné ióny tam, kde bolo pôvodne pomerne slabé pole a pomáhajú postupu výboja do oblasti pôvodne malej intenzity poľa. Naopak, v prípade záporného poľa, kladné ióny v blízkosti hrotu bránia brzdením pohybu elektrónov, rozvíjaniu lavín elektrónov.

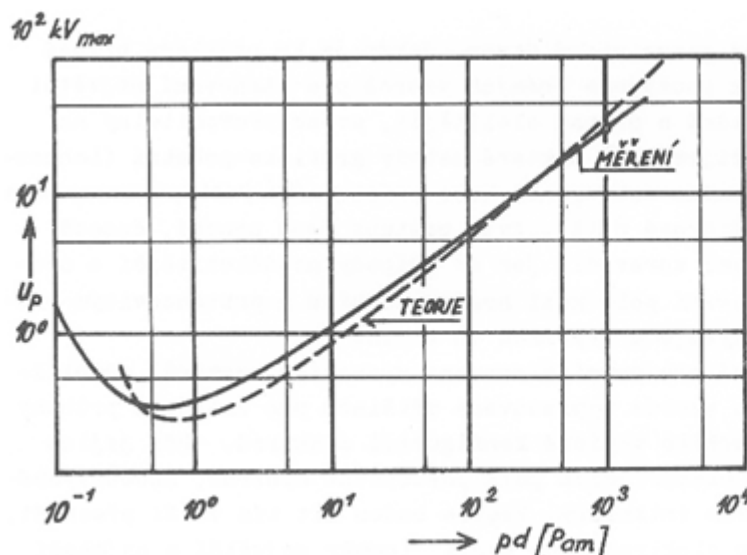
Pri jednosmernom napätí alebo pri napätí priemyselnej frekvencie 50 Hz je elektrická pevnosť plynov oveľa vyššia ako elektrická pevnosť pri vysokých frekvenciách v nehomogennom poli.[2]

### 3.3. ELEKTRICKÁ PEVNOSŤ VZDUCHU

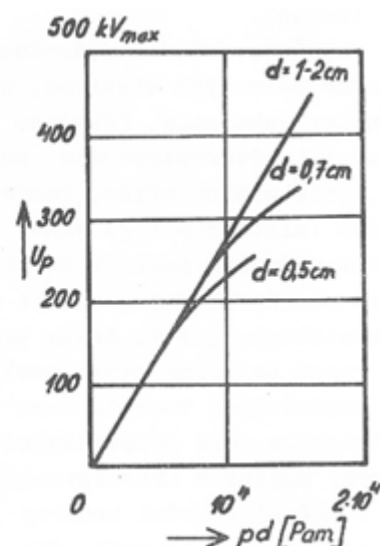
Elektrická pevnosť vzduchu v homogennom poli je podľa Paschenovej teórie funkciou súčinu tlaku  $p$  a doskokovej vzdialenosti  $d$  :

$$Up = f(p.d) \quad (7)$$

Na *obr.č.2* je zakreslená čiarkovane Paschenom vypočítaná vzdialenosť, plnou čiarou potom krivka nameraných hodnôt. Vidíme prijateľnú zhodu pomerne jednoduchej teórie s praxou. k určitej odchýlke dochádza jednak pri veľkých súčinoch  $p$  a  $d$ , jednak v oblasti ich najmenších súčinov, kde krivka vykazuje dokonca minimum. Čo sa týka veľkých súčinov, to je prakticky buď veľkých vzdialeností (vypínače vvn), alebo veľkých tlakov (tlakovzdušné vypínače) lepšie ako *obr.č.2* zaznamenáva túto odchýlku pre prípad veľkých tlakov (pri pomerne malých vzdialenostiach  $d$ ) *obr.č.3*. Zo závislosti na *obr.č.2* vyplýva, že počiatočnou orientačnou hodnotou pre výpočet vzdialeností v homogennom, alebo len mierne nehomogennom poli, je za normálneho tlaku a teploty elektrické namáhanie 30 kV/cm. Pritom pri striedavom napätí dosadzujeme vrcholovú hodnotu. Táto hodnota je na *obr.č.2* vyznačená krúžkom. [10]



Obr.č.2: Paschenova krivka



Obr.č.3: Odchýlka pri veľkých tlakoch

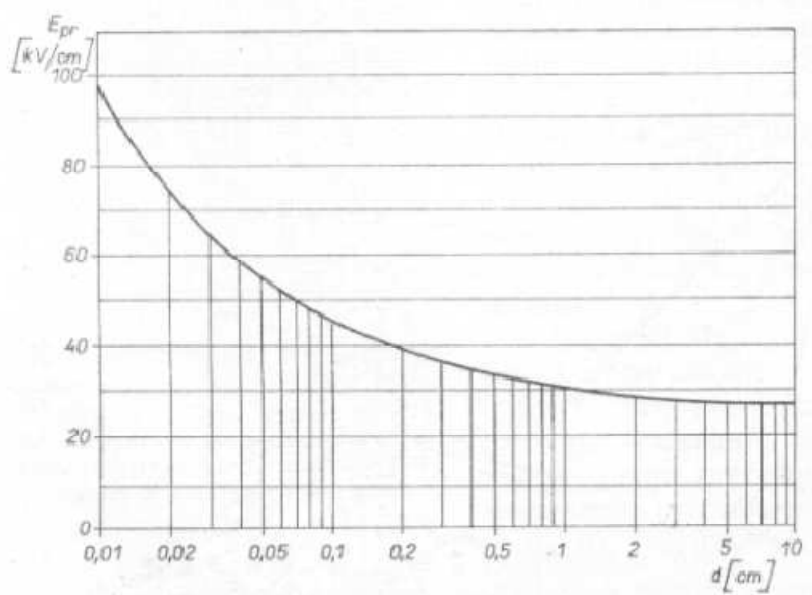
Minimum súčinovej vzdialenosti  $p \cdot d$  súvisí s počtom častíc ktoré sa nachádzajú v danom objeme pri tlaku klesajúcom hlboko pod atmosférickú veľkosť. Pod hodnotou minima krivky rozhoduje totiž v súčine  $p$  a  $d$  jedine tlak, pretože vzdialenosť elektród menšia než rádovo  $10^{-2}$  mm sa nedá prakticky uvažovať. Ak preto klesne počet častíc v jednotke výbojového priestoru pod určitú hranicu zväčšuje sa ďalej len stredná voľná dráha častíc a znižuje pravdepodobnosť ich zrážok pri prelete tejto strednej dráhy. Aby bol stav ionizácie udržaný a dochádzalo ku zrážkam nabitých častíc s ostatnými, je nutné zvýšiť intenzitu elektrického poľa. Ak sa tak nestane, elektrická pevnosť s ďalej klesajúcim tlakom stúpa postupne až na vysoké hodnoty vákua.

Hodnotu *minima prierazného napätia* vymedzuje nutnosť prekonania anódového a katódového spádu dútňavého výboja a preto toto minimum odpovedá napätiu asi 300 V. Súčasným dôsledkom tohto faktu je skutočnosť, že potenciálny rozdiel menší než týchto 300 V nie je schopný vyvolať prieraz vzduchovej medzery, ani keby mala minimálnu vzdialenosť, pretože nie je k dispozícii dostatočné napätie na vytvorenie anódového a katódového spádu a tým na rozvinutie výbojových javov.

*Polovinové prierazné napätie* je taká veľkosť rázového skúšobného napätia, ktorá vyvolá v priemere pri každom jeho druhom priložení prieraz. Krajné napätie, ktoré nespôsobí prieraz v žiadnom prípade, teda napätie teoreticky výdržné je ťažko zistiteľné. Okolnosť, prečo je ťažké vypracovať závislosti pre výdržné napätie súvisí so statickou charakteristikou prierazného javu pri krátkodobom pôsobení napät'ovej vlny, vyvolanou podmienkou nutnej prítomnosti voľného elektrónu v priestore medzi elektródami. Ak sa nenachádza v tomto priestore po priložení napätia ani jediná nabitá častica, predovšetkým teda voľný elektrón, nemôže prebehnúť žiadna ionizácia a prostredie zostáva nevodivé. Náhodnosť okamžiku vstupu voľného elektrónu do priestoru elektrického poľa určuje dobu tzv. štatistického oneskorenia vzniku výboja. Je to doba od okamžiku pripojenia napätia na elektródy do okamžiku vstupu voľného elektrónu, ktorého urýchľovaním a následnými zrážkami dochádza až k prierazu prostredia. Celkové oneskorenie výboja však nie je dané len touto štatistickou dobou oneskorenia. Časový úsek nadväzujúci na okamžik výskytu voľného elektrónu a končiaci okamžikom plného prierazu, to je doba tvorenia výboja, nie je tak isto konštantný a má svoj časový rozptyl. [10]

Výsledné oneskorenie výboja môže byť dlhšie ako doba čela rázovej vlny. Za týchto okolností nemusí nastať prieraz v každom pripojení vyššieho napätia, než je statické prierazné napätie (to je najmenšie prierazné napätie pri dlhodobom pôsobení) danej elektródovej sústavy. Preto je stanovenie krajného prierazného napätia záležitosťou pomerne neurčitou. Izolácia sa overuje napätím, ktoré norma nazýva výdržným, čo je napätie 10 % pravdepodobnosti zlyhania. V literatúre sa zatiaľ stretávame len s údajmi prierazného napätia polovinového, teda napätie pri ktorom polovica z prevedených rázových skúšok končí prierazom.

Doskoková vzdialenosť vypočítaná pomocou vzorcov pre päťdesiatpercentné napätie je teoreticky kratšia než vzdialenosť plne vyhovujúca. Preto ak prepočítame dráhu vypočítanú pre skúšobné napätie striedavé, vzorcom pre polovinové rázové napätie a tento vzorec vedie k dlhšej dráhe potom teoreticky ani táto predĺžená dráha nie je ešte vyhovujúca.



Obr.č.4: Závislosť elektrickej pevnosti vzduchu od vzdialenosti elektród

Ak sledujeme priebeh veľkosti meranej elektrickej pevnosti homogénneho poľa pri normálnom tlaku a teplote, prepočtom z hodnôt  $p \cdot d$  podľa krivky z obr.č.2 získame závislosť zaznamenanú na obr.č.4. Vidíme, že prierazná pevnosť vzduchu s klesajúcou vzdialenosťou ( $d$ ) rastie. Zrejme sa stáva vytváranie prierazu pri malých vzdialenostiach obtiažnejšie. Zatiaľ čo homogénne pole je prípadom poľa, vyskytujúceho sa v elektrických prístrojoch len výnimočne, druhý možný extrémny stav, pole silne nehomogénne, je prípadom, ktorý sa stal základom pre predbežné početné určovanie izolačných vzdialeností. krajný prípad nehomogenosti predstavuje buď pole medzi hrotovými elektródami, alebo pole medzi hrotom a rovinou.

Ak meriame elektrickú pevnosť takých elektródových útvarov zistíme, že jejich prierazná pevnosť rastie s doskokovou vzdialenosťou približne exponenciálnym priebehom a pri veľkých vzdialenostiach elektród ( $d > 30$ ) potom takmer lineárne. Stredná hodnota elektrického namáhania na medzi pevnosti teraz podstatne nižšia ako v prípade homogénneho poľa. Predstavuje asi 5 kV/cm pri vzdialenostiach rádovo 10 cm a len asi 3 kV/cm pri doskokových vzdialenostiach elektród rádovo 100 cm. [10]

Prevedené merania tiež ukázali, že veľkosť prierného napätia nezávisí len na tvare elektród, ale aj na ich orientácii voči zemi. U sústavy hrot – rovina potom veľmi značne na polarite elektród, ak sa jedná o namáhanie polarizovaným napätím.

V literatúre býva závislosť prierného napätia na doskokovej vzdialenosti tlmočená analytickými výrazmi lineárneho charakteru. Také vzťahy potom však platia len pre zmienené vzdialenosti ( $d > 30$ ) a sú použiteľné len pre dimenzovanie vzdušnej izolácie u zariadení veľmi vysokého napätia. Aby boli k dispozícii vzorce pre výpočet prierného napätia použiteľné aj pre oblasť prístrojov vysokého napätia, bolo nutné vypracovať vzťahy zložitejšie, vzťahy rozšírené o exponenciálny člen.

Viac informácií vid'.[10]

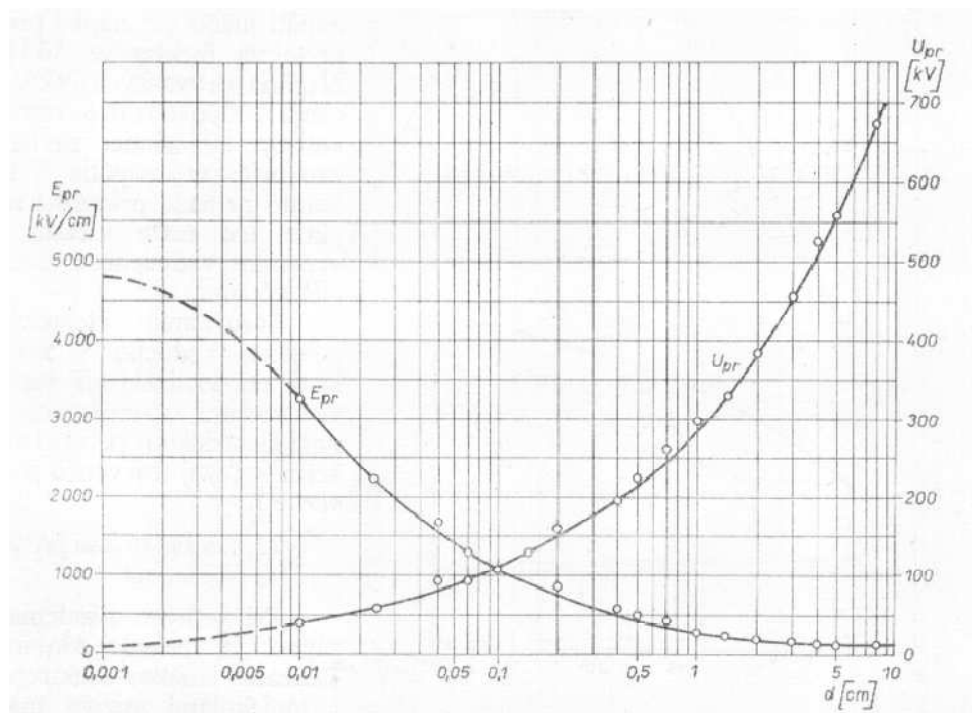
### **3.4. ELEKTRICKÁ PEVNOSŤ VÁKUA**

Pravdepodobnosť ionizácie zrážkou elektrónov s molekulami je pri veľkých zriedeniach plynu veľmi malá. Avšak pri pokusoch sa zistilo, že na vznik malého prúdu, dokonca niekedy aj objavenie iskry stačí aj v najdokonalejšom vákuu dostatočne veľká intenzita elektrického poľa. Je to celkom pochopiteľné, ak predpokladáme, že tento prúd spôsobuje tzv. studená emisia - autoemisija teda, že prúd vzniká pri výstupe elektrónov z povrchu katódy.

Termoemisija je elektrickým poľom zvyšovaná tak, že pole zmenšuje výstupnú prácu elektrónov z kovu. Elektrická pevnosť vákua závisí od stavu povrchu elektród a materiálu.

Studená emisija môže nastať v čistej forme len vtedy, ak je medzi elektródami minimálna vzdialenosť, rádovo desatiny milimetra a menej. Ak je vzdialenosť väčšia môžeme pozorovať jav plného napätia. Pri prelete pomerne veľkých vzdialeností bez zrážky získavajú elektróny v silných elektrických poliach energiu rádovo až stotisíc eV. Ak anódu bombardujú rýchle elektróny, vznikajú fotóny a súčasne sa môžu sa z povrchu anódy uvoľňovať kladné ióny. Povrchovú ionizáciu spôsobujú fotóny a kladné ióny, vytvorené rýchlymi elektrónmi, letiace smerom ku katóde.

Vzhľadom na veľkú elektrickú pevnosť vákua môžu mať vákuové prístroje a zariadenia malé vnútorné rozmery. V konštrukciách s vákuom môže byť výboj spôsobený rôznymi vedľajšími javmi, ako sú napríklad preskok pozdĺž stien nádoby, porušenie vákua časticami plynu, ktoré sa uvoľnili z elektród alebo zo stien nádoby, a podobne. Preskoku pozdĺž povrchu sa zabraňuje tak, že sa volia oveľa väčšie rozmery nádoby, ako je vzdialenosť medzi elektródami. Aby sa odstránilo zvýšenie tlaku uvoľňovaním častíc plynu, necháva sa vákuová konštrukcia dlho pod napätím. Popritom častice plynu pohltia elektródy a steny nádoby a vákuum sa obnoví.



Obr.č. 5: Závislosť prieražného napätia a elektrickej pevnosti vákua od vzdialenosti medzi elektródami guľou priemeru 25 mm a doskou z nehrdzavejúcej ocele

### 3.4.1. VEDENIE ELEKTRICKÉHO PRÚDU VO VÁKU

Aj v súčasnosti sa v niektorých špeciálnych oblastiach ešte uplatňujú elektronické súčiastky, ktoré majú základ v emisii elektrónov z rozžeravenej katódy a ich prechod vákuom na anódu. A však aj v iných súvislostiach má tento jav význam.

Pri prijatí dostatočne veľkej energie sa môže elektrón, pri vhodne orientovanej rýchlosti dostať z povrchu pevnej látky do okolia. Teplo býva najčastejšie zdrojom tejto energie. Na opustenie látky majú zrejme najväčšiu šancu elektróny s najväčšou energiou. V kove sú takými elektróny s energiou z okolia Fermiho energie. Avšak aj v polovodičoch a izolantoch možno dokázať, že u nich prebieha uvoľňovanie elektrónov do okolia tak, ako keby odchádzali z Fermiho hladiny.

V prípade, že sa medzi dvoma elektródami nachádzajú voľné nosiče elektrického náboja, je možné ich uviesť do pohybu pripojením elektród na elektrické napätie. Tento prúd za nezmenených pomerov závisí na veľkosti napätia na elektródach a uzatvára prúdový okruh. Vonkajšie elektrické alebo magnetické pole môže ovplyvniť pohyb elektricky nabitých častíc.

### 3.5. ELEKTRICKÉ VÝBOJE

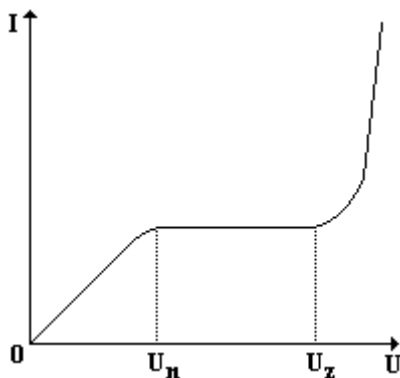
Aj látka plynného skupenstva môže obsahovať voľne pohyblivé elektricky nabité častice (elektróny, ióny) a preto môže viesť elektrický prúd. Pod *štúdiom elektrických výbojov* rozumieme skúmanie vodivosti látky v plynnom skupenstve. Pritom nejde o skúmanie miestneho pohybu jednotlivých častíc z hľadiska ich početných zrážok s ostatnými časticami, ale je nutné uvážiť len makroskopicky unášavý pohyb celej sústavy častíc. Tento pohyb je podmienený jednak prítomnosťou magnetického, elektrického, poprípade gravitačného poľa, a tiež prítomnosťou nerovnomerného rozloženia teploty alebo tlaku sledovanej sústavy. Makroskopicky unášavý pohyb je určený veľkosťou a rozložením tlaku a teploty, charakterom polí, druhom plynu, tvarom a veľkosťou výbojového priestoru a ďalšími, niekedy ťažko zistiteľnými javmi.

Základné rozdelenie na samostatné a nesamostatné elektrické výboje sa prevádza podľa toho, či je vytvorenie elektricky nabitých častíc, vytvorených z elektricky neutrálnych častíc, viazané na nejaké vonkajšie *ionizačné činidlo*. Ionizačným činidlom môžu byť častice aj polia, ktoré predávajú odpovedajúce množstvo energie k ionizácii.

*Nesamostatným* výbojom sa nazýva taký elektrický výboj, ktorý zanikne v okamihu, kedy prestane pôsobiť ionizačné činidlo. Elektrický výboj, ktorý sa udrží aj v prípade, že ionizačné činidlo prestane pôsobiť, sa nazýva *samostatným* výbojom.

#### 3.5.1. SAMOSTATNÝ ELEKTRICKÝ VÝBOJ

Medzi samostatné elektrické výboje môžeme zaradiť: blesk, vysokofrekvenčný, iskrový, oblúkový, temný, dútnavý výboj a koronu.



Obr. č.6: Voltampérová charakteristika výboja

Sústava na sledovanie elektrického výboja je zložená z dvoch elektród, ktoré sú umiestnené vo výbojovej trubici, v ktorej je možnosť regulácie tlaku plynu. Na začiatku je nutné ionizovať výbojový priestor. V tom momente tečie medzi elektródami prúd nesamostatného výboja.

Elektrický prúd rastie spolu so vzrastajúcim napätím, až pri určitej hodnote napätia sa zmení nesamostatný výboj na samostatný výboj. Tento druh výboja sa volá *temný - Townsendov výboj*. Zmenou odporu vonkajšieho obvodu výbojovej trubice môžeme regulovať veľkosť prúdu v širokých medziach.

Aj názov výboja nám napovedá , že svetelné žiarenie je v tejto oblasti zanedbateľné. Ďalšie zvyšovanie prúdu sa na vývojovej trubici prejaví poklesom napätia, to znamená, že vlastná ionizácia je ľahšia a menej stratová, objavujú sa pri nej svetlé a tmavé oblasti výboja a temný výboj prechádza v dútnavý.

*Dútnavý výboj* sa vyznačuje charakteristickým rozložením priestorového náboja vo výbojovej trubici a konštantným napätím. *Anomálny dútnavý výboj* nastáva pri ďalšom zvyšovaní prúdu pri ktorom zároveň dochádza k prudkému nárastu napätia. Do režimu *oblúkového výboja* prechádza anomálny dútnavý výboj cez prechodovú oblasť, pri ďalšom zvyšovaní prúdu. Sprevádzajúci pokles napätia na výbojovej trubici je zapríčinený účinnou tepelnou emisiou. V prípade, že zdroj nie je schopný trvale dodávať dostatočné množstvo prúdu, premení sa dútnavý výboj na iskru, ktorá následne zhasne. Dútnavý výboj obyčajne vzniká v zriedených plynch. Pri vyšších hodnotách tlaku je na vznik dútnavého výboja potrebná špeciálna úprava elektród.

*Astonov temný priestor* sa nachádza tesne pri katóde. Elektróny, ktoré sú v ňom urýchlené, získajú len takú malú energiu, že nestačí na ich ionizáciu. Ďalej od katódy sa nachádza *svietiaci katódová vrstva*. Značné zrýchlenie získavajú elektróny v *Crooksovom temnom katódovom priestore*.

Elektróny strácajú zrážkami časť svojej energie v oblasti *dútnavého katódového svetla* a následne vstupujú do *Faradayovho temného priestoru*. Priestorový náboj *kladného stĺpca* dútnavého výboja je takmer nulový. Ďalej nasleduje, po menšej anódovej temnej vrstve, *anódové dútnavé svetlo*. Dútnavý výboj má široké využitie napríklad v oblasti stabilizátorov na trubice a žiarivky.

Od dútnavého výboja sa *oblúkový výboj* líši predovšetkým teplotou kladného stĺpca, pochodmi súvisiacimi s emisiou elektrónov z katódy, a svojou katódou časťou. Pri oblúkovom výboji je veľká prúdová hustota. Teplota kladného stĺpca oblúkového výboja sa obvykle pohybuje v rozmedzí 5 000 - 30 000 K. Teplo ktoré vzniká pri oblúkovom výboji sa dá využiť na ohrev v taviacich peciach, prípadne na zváranie. Oblúk sa uplatňuje aj v osvetľovacej technike.

*Koróna* je vlastne samostatný stabilný typ výboja, vznikajúci v nehomogénnom elektrickom poli. Prejavuje sa svetielkujúcou vrstvou vznikajúcou okolo vodiča. V tejto vrstve dochádza k ionizácii plynu. Tento jav je sprevádzaný charakteristickým praskotom a šumením.

*Iskový výboj* má vzhľad kľukatých, rozvetvujúcich sa jasne svietiacich, tenkých nitiek alebo kanálikov. Teplota iskier sa pohybuje okolo 10 000 K. Plyn, v ktorom iskra vzniká, sa rozpína ohrevom, a to je sprevádzané rôznymi akustickými javy. Vplyvom rýchlych zmien tlaku vzniká rázová vlna, ktorá sa podieľa na ďalšej ionizácii prostredia. Iskra je nestacionárny výboj. Blesk je vlastne prírodná forma iskry. Elektróny alebo ióny dopadajú na vodič podľa jeho polarít. Nosiče náboja tiež polarít ako vodič sú odpudzované do vonkajšej oblasti koróny.

Náuka o plazme vystihuje podstatu popísaných javov. Lokálne zrážkové javy sú charakteristické pre plyn, ktorý tvoria elektricky neutrálne častice. Vlastnosti plazmy sú výrazne odlišné. *Plazma* je kvázi neutrálny plyn neutrálnych a nabitých častíc, ktoré majú tzv. *kolektívne chovanie*. Kvázi neutrálny je preto, že výsledný elektrický náboj sledovanej sústavy je nulový.

Na kolektívne chovanie je nutná prítomnosť nabitých častíc (tvoriacich napríklad Slnko), ktoré sprevádzajú elektrické a magnetické pole a môžu sa rôzne zoskupovať. Tieto polia dokážu ovplyvňovať pohyb ďalších nabitých častíc aj na vzdialenom mieste. Takto sa realizuje interakcia na veľkú vzdialenosť. Pokiaľ je tento typ interakcie dominantný, označuje sa plazma ako vysokoteplotná.

Ako nízкотеплотná sa plazma označuje pokiaľ je treba prihliadať na zrážkové javy.

Pojem plazmy môže rozšíriť aj na pevné látky, ako sú vodiče a polovodiče. Plazma v pevnej fáze sa od normálnej plazmy líši veľkosťou energie (teplota sústavy) častíc a usporiadaním iónov do pevnej kryštalickej mriežky.

Viac informácií viď. [2,5,7,8]

## 4. VZDUCH

Je najčastejšie používaný plyn v elektrotechnike. Je zmesou rôznych plynov. Ich objemové podiely vo vzduchu a body varu za normálnych podmienok (20 °C,  $1,012 \cdot 10^5 \text{ N.m}^{-2}$ ) sú uvedené v tabuľke 1. [1,3]

### 4.1. ZLOŽENIE VZDUCHU

Tab. č. 2: Zloženie vzduchu

Plyn obsiahnutý vo vzduchu	Objemový podiel [%]	Bod varu [°C]
Dusík N <sub>2</sub>	78	-196
Kyslík O <sub>2</sub>	21	-183
Argón Ar	0,9325	-186
Kysličník uhličitý CO <sub>2</sub>	$3 \cdot 10^{-2}$	-78,5
Neón Ne	$1,61 \cdot 10^{-3}$	-246
Hélium He	$4,6 \cdot 10^{-4}$	-269
Metán CH <sub>4</sub>	$1 \cdot 10^{-4}$	-161,4
Vodík H <sub>2</sub>	$1 \cdot 10^{-4}$	-253
Kryptón Kr	$1,08 \cdot 10^{-4}$	-153
Xenón Xe	$8 \cdot 10^{-6}$	-109

**Vzduch ale môže ďalej obsahovať:**

- Vodné pary
- Ďalšie plyny (CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> NH<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>)
- Aerosoly (prach, peľ, mikroorganizmi)
- Ďalšie iné plyny (agresívne, jedovaté, horľavé, výbušné)
- Chemické prvky a látky
- Prachové častice



## 4.2. ZÁKLADNÉ FYZIKÁLNE VLASTNOSTI VZDUCHU

Tabuľka č. 3: Objemové podiely vo vzduchu pri 0°C

Vlastnosť	Jednotka	Rozmer	Hodnota
Teplota varu	$T_v$	°C	-194,5
Teplota topenia	$T_t$	°C	-213,4
Plynová konštanta	R	J/kg.K	287,10
Molová hmotnosť	M	Kg/kmol	28,96
Molový objem	$v_0$	m <sup>3</sup> /kmol	22,40
Izoentropický exponent	$K=c_p/c_v$	-	1,40
Hustota	$\rho_0$	kg/m <sup>3</sup>	1,29
Merná tepelná kapacita(0 °C)	$c_p$	kJ/kg.K	1,01
Merná tepelná kapacita(0 °C)	$c_v$	kJ/kg.K	0,72

Popri plynoch uvedených v tabuľke obsahuje vzduch aj vodne pary. Ak obsahuje vzduch pri určitej teplote menej než 50 % množstva vodnej pary, označuje sa ako suchý. Pri väčšom obsahu až do 90 % sa označuje ako vlhký. Okrem samotných plynov je treba vo vzduchu počítať i s prítomnosťou prachu.

Tabuľka č. 4: Obsah vodných par vo vzduchu

Teplota [°C]	Množstvo vodných par nasýteného vzduchu [kg/m <sup>3</sup> ]
50	$81,0 - 10^{-3}$
40	$51,1 - 10^{-3}$
30	$30,3 - 10^{-3}$
20	$17,3 - 10^{-3}$
10	$9,4 - 10^{-3}$
0	$4,8 - 10^{-3}$
-10	$2,1 - 10^{-3}$

## 4.3. VLHKOSŤ VZDUCHU

Vlhký vzduch je zmes suchého vzduchu, ktorá neobsahuje molekuly vody ani vodnej pary. Nenasýtený vlhký vzduch je zmes suchého vzduchu s prehriatou vodnou parou, a nasýtený vlhký vzduch je zmesou vzduchu so sýtou vodnou parou. Väčšina výpočtov pre vlhký vzduch sa počíta pre tlaky blízke tlaku atmosférickému [4].

Vlhký vzduch je zmesou suchého vzduchu a vodní pary, preto je celkový tlak vlhkého vzduchu súčtom čiastočných tlakov suchého vzduchu  $p_v$  a vodní páry  $p_p$ :

$$p = p_v + p_p \quad (8)$$

#### 4.3.1. FYZIKÁLNE VELIČINY A JEDNOTKY VHLKÉHO VZDUCHU

**Maximálna ( $A$ ) a absolútna ( $a$ ) a vlhkosť vzduchu** udáva okamžitý a maximálny obsah (hustotu) vodných pár vo vzduchu v hmotnostných jednotkách na jednotku objemu, t.j. v  $\text{g.m}^{-3}$ . Vypočíta sa zo vzorca:

$$a = 220 \frac{e}{T} [\text{g.m}^{-3}] \quad (9)$$

**Sýtočný doplnok** napätia vodných pár ( $d$ ) udáva rozdiel napätia nasýtenia ( $e_0$ ) a skutočného napätia vodných pár vzduchu ( $e$ ):

$$d = e_0 - e [\text{Pa}] \quad (10)$$

Sýtočný doplnok absolútnej vlhkosti ( $d$ ) sa vypočíta z rozdielu:

$$d = A - a [\text{g.m}^{-3}] \quad (11)$$

**Teplota rosného bodu ( $t_r$ )**, je teplota, pri ktorej sa vzduch nasýti vlastným obsahom vodnej pary ( $e=e_0$ ,  $r=\%$ ,  $d=0$ )

**Napätie nasýtenia vodných pár ( $e_0$ ) a skutočné napätie ( $e$ )** vyjadrujú okamžitý a maximálne možný obsah vodných pár v atmosfére v tlakových jednotkách, teda v pascaloch (Pa), alebo hektopascaloch (hPa). Z psychrometrickej rovnice môžeme tento tlak vypočítať:

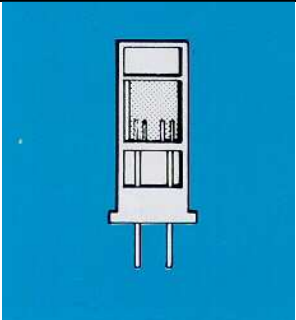
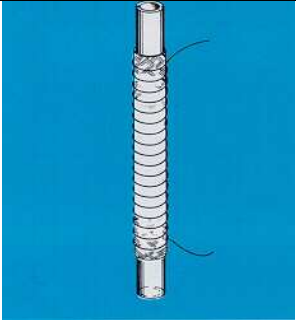
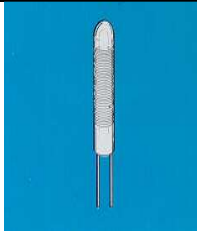

$$e = e_0 - Ap(T_s - T_v) \quad (12)$$

kde  $e_0$  je napätie nasýtenia v hPa pri  $T_v$ ,  $A$  je psychrometrický koeficient,  $T_s$  je teplota suchého teplomera,  $T_v$  je teplota vlhkého teplomera,  $p$  je barometrický tlak v mieste merania v hPa.

kde  $e$  je skutočné napätie vodných pár v Pa,  $T$  je absolútna teplota vzduchu v  $^{\circ}\text{K}$ .

**Špecifická vlhkosť vzduchu ( $q$ )** je pomer hustoty vodných pár k celkovej hustote vlhkého vzduchu a v praxi sa vyjadruje v  $\text{g.kg}^{-1}$ . [9]

### 4.3.2. ZÁKLADNÉ PRINCÍPY MERANIA VLHKOSTI VZDUCHU

<p><b>1. Kapacitná metóda</b></p> <p>Absorpciou vodnej pary polymérového filmu je naneseného na stabilnej sklenej platni sa mení jeho kapacita, čo sa prejaví na zmene elektrického signálu.</p>	
<p><b>2. Absorbčná metóda</b></p> <p>Základ metódy je vo vlastnosti LiCl intenzívne absorbovať vodu a tak sa stať elektricky vodivým. LiCl je nenesené na sklenenom hodvábe. Vláknó s LiCl je elektricky vyhrievané, až kým vodivosť neklesne odparením absorbovanej vody. Množstvo energie potrebné na vysušenie absorbovanej vlhkosti je základom merania.</p>	
<p><b>3. Psychrometrický rozdiel</b></p> <p>Je to vlastne rozdiel v nameraných teplotách dvoch teplomerov. Jedného suchého a druhého mokrého.</p>	
<p><b>4. Rozťažnosť látok</b></p> <p>Princíp spočíva v rozťažnosti ľudských vlasov, v niektorých prípadoch špeciálnych syntetických vlákien v dôsledku pohlcovania vzdušnej vlhkosti, a následný prenos registračné zariadenie.</p>	

Obr.č.7: Základné princípy merania vlhkosti vzduchu

### 4.3.3. PREHĽAD METÓD A PRÍSTROJOV NA MERANIE VLHKOSTI VZDUCHU

Vlhkosť vzduchu je možné merať viacerými metódami. V súčasnosti sa využívajú najmä tieto tri metódy:

- **elektrická,**
- **hygroskopická,**
- **psychrometrická.**

#### 4.3.3.1. *ELEKTRICKÁ METÓDA MERANIA VLHKOSTI VZDUCHU*

Najčastejším z viacerých možných princípov na meranie vlhkosti elektrickými prístrojmi je psychrometrický spôsob. Rovnako ako u uvedených psychrometrov sa aj v tomto prípade meria psychrometrický rozdiel, odlišnosť je v tom, že sa namiesto teplomerov používajú termočlánky. Suchý teplomer zastupujú teplé spoje termočlánkovej batérie, a vlhký teplomer studené spoje obalené pančuškou. Na zistenie psychrometrického rozdielu je ešte potrebné merať teplotu vzduchu. V najmodernejších prístrojoch sa používa kapacitná a absorbčná metóda.

#### 4.3.3.2. *PSYCHOMETRICKÁ METÓDA MERANIA VLHKOSTI VZDUCHU*

V meteorológii je to najčastejšie používaná metóda merania vlhkosti. Prístroje využívajúce túto metódu majú dva teplomery: "vlhký" a "suchý", ktorými sa meria vlhká teplota ( $T_v$ ) a suchá teplota ( $T_s$ ). Teplomerná nádobka vlhkého teplomera je zasunutá do mušelínovej pančušky a táto je navlhčovaná destilovanou vodou. Odparovaním vody z pančušky vlhkého teplomera sa odoberá teplo z jeho blízkosti a to sa na teplomery prejaví poklesom teploty. Medzi hodnotami na teplomeroch vzniká teplotný rozdiel, ktorý sa nazýva psychrometrická diferencia. Pomocou psychrometrickej rovnice môžeme tento rozdiel využiť na výpočet vlhkosti, alebo sa k nemu vlhkosť určí priamo podľa psychrometrických tabuliek.

#### **Augustov psychrometer**

Niekedy nazývaný aj "neventilovaný". Používaný často v staničnej sieti. Augustov psychrometer je zložený z dvoch staničných teplomerov umiestnených na spoločnom stojane v meteorologickej budke vo výške 2 m nad zemou. Mušelínová pančuška vlhkého teplomera je ponorená do nádoby s destilovanou vodou, takže nepretržite navlhčuje teplomer. Na vyjadrenie veličín " $r$ " a " $e$ " sú zostavené tabuľky pre  $T_s$  a  $T_v$ . V prípade zamrznutia vody na pančuške, sa musí vlhkosť určovať podľa tabuliek s označením "ľad". Pri menších teplotách ako  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  je meranie menej spoľahlivé.

#### **Assmanov aspiračný psychrometer**

Aspiračný psychrometer je používaný na presnejšie merania vlhkosti vzduchu. Taktiež je zložený z dvoch teplomerov, ktoré sú ale na rozdiel od predošlého psychrometra zasunuté do dvoch spojených rúrok, cez ktoré je pomocou ventilátora preháňaný vzduch o rýchlosti  $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a vyššej. Pre Assmanov psychrometer sú zostavené špeciálne tabuľky, ktoré sú počítané pre rýchlosť prúdenia vzduchu 2 alebo  $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Pred začatím merania je potrebné najskôr navlhčiť pančušku vlhkého teplomera destilovanou vodou, a až potom natiahnuť aspirátor. Keď sa teploty na teplomeroch po určitej dobe ustália, odčítame hodnoty  $T_s$  a  $T_v$ . Pri meraní môžeme prístroj zavesiť, alebo ho držíme v rukách v potrebnej výške. Aspiračný psychrometer je často využívaný na meranie v teréne. Proti priamemu slnečnému žiareniu je prístroj chránený lesklými stenami.

## **Psychrografy**

Psychrografy sa skladajú z dvoch teplomerných receptorov. Jeden z nich je upravený ako "vlhký" s trvalým prívodom vody. Na tento účel sa hodia najlepšie manometrické termografy. Tieto môžu pracovať iba pri kladných teplotách, pretože pri záporných teplotách voda zmrzne a nehýbe sa. Prístroje sa dajú upraviť aj na diaľkovú registráciu.

### **4.3.3.3. *HYGROSKOPICKÁ METÓDA MERANIA VLNKOSTI VZDUCHU***

Metóda využívajúca hygroskopické vlastnosti niektorých látok, ktoré majú schopnosť pohlcovať, alebo uvoľňovať vodné pary a pri tom meniť svoj objem. Najvhodnejšie sú na tento účel ľudské vlasy, alebo živočíšne črevné blany, ktoré sa predlžujú pri pohlcovaní vodných pár, pri stúpajúcej relatívnej vlhkosti, pri poklese vlhkosti sa skracujú. Takto vzniknuté zmeny dĺžky sa prenášajú na prispôbenú stupnicu prístroja prevodovým mechanizmom.

#### **Vlasový vlhkomer - hygrometer**

Ako látku s hygroskopickými vlastnosťami využíva zväzok odmastených ľudských vlasov. Podľa zmeny ich dĺžky sa prístrojom priamo meria relatívna vzdušná vlhkosť. Keďže predlžovanie nie je rovnomerné, majú nižšie relatívne vlhkosti väčšie dieliky na stupnici. Ak sa prístroj nachádza dlhšiu dobu v suchom prostredí, reaguje na zmeny vlhkosti vzduchu horšie. V tom prípade je potrebná regenerácia prístroja. Pri regenerácii sa prístroj obalí asi na 24 hodín do navlhčenej látky. Na konci tejto procedúry má prístroj ukazovať hodnotu 95 až 97 %. Ak ukazuje inú hodnotu, posunieme ručičku na hodnotu 96 %. Zaprášené, alebo inak znečistené vlasy môžeme očistiť jemným štetcom, destilovanou vodou, alebo liehom.

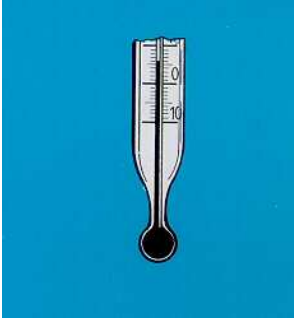


Prístroj sa umiestňuje do meteorologickej žalúzievej búdky vedľa psychometru. Pred odčítaním hodnoty treba na prístroj jemne poklepať, aby sa uvoľnil mechanizmus a ručička nadobudla správnu polohu. Vlasový vlhkomer kontrolujeme podľa Augustovho psychometra a opravy robíme justačnou skrutkou.

#### **Hygrograf**

Je to prístroj, ktorý dokáže merať a zároveň registrovať relatívnu vlhkosť vzduchu. Princíp merania rovnaký ako u vlasového vlhkometru. Po konštrukčnej stránke sa prístroj okrem senzorickej časti zhoduje s termografom. U najmodernejších hydrografov sa ako hygroskopické látky používajú namiesto odmastených vlasov preparované črevné blany a blany z umelých hmôt. Hygrografy v spoločnej konštrukcii s termografmi sa nazývajú termohygrografy.

Viac informácií vid'. [4,9]

#### 4.4. ZÁKLADNÉ PRINCÍPY MERANIA TEPLoty

<p><b>1. Rozťažnosť kvapalín</b> Funguje vďaka rozťažnosti ortuti, alebo liehu so zmenou teploty.</p>	
<p><b>2. Zmeny odporu kovov so zmenou teploty</b> Meracou časťou je na cievke navinutý platinový drôtik. Pri zmene teploty vzduchu sa mení odpor drôtika. Zmena odporu sa meria multimetrom.</p>	
<p><b>3. Bimetal</b> Bimetal je zložený z dvoch navzájom spojených kovových platní z rôznych materiálov. V dôsledku rozdielnych koeficientov rozťažnosti rôznych kovov sa bimetal ohýba. Ohnutie je mierou meniacej sa teploty.</p>	
<p><b>4. Infratermometria</b> Teplotu aktívneho povrchu určuje na základe vyžarovaného infračerveného žiarenia.</p>	

Obr.č.8: Základné princípy merania teploty

## 4.5. METÓDY A PRÍSTROJE NA MERANIE TEPLoty VZDUCHU

So zmenou teploty látky sa menia aj jej fyzikálne a geometrické vlastnosti. Na tejto skutočnosti sú založené metódy merania teploty. Podľa toho, aká látka a jej fyzikálna zmena sa využíva pri meraní, delia sa teplomery na:

1. **kvapalinové sklené: ortuťové, liehové a i.,**
2. **elektrické: odporové, termoelektrické,**
3. **deformačné: bimetalické, manometrické,**
4. **bezkontaktné.**

### 4.5.1. TEPLOMERY KVAPALINOVÉ SKLENÉ

Kvapalinové teplomery sú najčastejšie používané v sieti agrometeorologických, synoptických a klimatických staníc. Meranie je založené na rozťažnosti kvapaliny (ortuť, lieh, kreozot a pod.) v sklenej nádobke. Koeficient tepelnej expanzie kvapalín je oveľa vyšší ako u skla a preto pri zväčšovaní objemu prúdi kvapalina do kapiláry, pričom vytvára stĺpec, ktorého horná hranica označuje hodnotu na stupnici. Rozsah stupníc na meranie teploty vzduchu sa v našich zemepisných šírkach pohybuje v hodnotách od -30 až do 50 °C.

Pred tepelnými účinkami slnečného žiarenia sú teplomery chránené umiestnením do rôzne konštruovaných meteorologických búdok, alebo sa zatieňujú tienidlami. Najčastejšie používané teplomery v meteorológii a klimatológii sú extrémne a staničné teplomery.

### Extrémne teplomery

#### Minimálny teplomer

Ako teplomerná látka sa používa lieh. Skutočnú teplotu vzduchu udáva vždy horný koniec liehového stĺpca v kapiláre. Tmavá sklená tyčinka tiež označovaná ako index, ktorá sa môže v liehovom stĺpci voľne pohybovať ukazuje najnižšiu teplotu.

Ak nakloníme teplomer teplomerovou nádobkou nahor, index voľne spláva po meniskus, a tam ho zachytí jemná blanka, ktorá vznikla povrchovým napätím kvapaliny. Pri takejto polohe indexu sa kladie minimálny teplomer vodorovne do stojana. Pri poklese teploty sa znižuje objem liehu, tým sa skracuje jeho stĺpec, meniskus povrchovou blankou zachytí index a sťahuje ho so sebou až do extrémnej minimálnej polohy. Index zostáva v tejto polohe aj po následnom vzostupe teploty. Vtedy môže lieh voľne prúdiť okolo indexu bez toho, aby sa tento posunul v opačnom smere. Minimálna hodnota nameranej teploty sa odčíta na tom konci indexu, ktorý sa dotýkal menisku pri poklese teploty. Pri nastavení teplomera na nové meranie je nutné ho nakloniť nádobkou nahor, aby index pomaly sklúzol až ku koncu kvapalinového stĺpca.

### Prízemný minimálny teplomer

Pre rastlinstvo je dôležitá minimálna teplota, vzhľadom na to sa na niektorých staniciach meria aj minimum teploty vzduchu v o výške 5 cm nad povrchom zeme. Rovnaký teplomer sa používa na meranie minimálnej teploty v búde. S týmito prístrojmi sa meria na voľnom priestranstve nad krátko zostrihaným trávnikom. Stojan na teplomer je položený na trávniku, alebo na snehu, v prípade snehovej pokrývky vyššej ako 5 cm. Prízemná minimálna teplota sa odčítava pri rannom pozorovaní, a na nové meranie sa teplomer znovu nastavuje večer.

### Maximálny teplomer

Maximálny teplomer je určený na meranie maximálnej teploty v stanovenom časovom intervale. Má podobnú konštrukciu ako lekárske teplomer. Na zachytenie najvyššej nameranej hodnoty teploty je upravený tak, že kapilára je nad teplomernou nádobkou zúžená vsunutou sklenou tyčinkou. Zúženie kapiláry komplikuje prechod ortuti do kapiláry a naspäť.

Pri stúpaní teploty však zväčšovaním objemu ortuti v teplomernej banke vzniká taký veľký tlak, že ortuť prekoná odpor zúženého hrdla a vystupuje do kapiláry až do maxima.

Horný koniec stĺpca ortuti v tom momente ukazuje skutočnú teplotu vzduchu. Pri poklese teploty začne ortuť zmenšovať svoj objem a má tendenciu vrátiť sa z ortuťového stĺpca v kapiláre naspäť do banky. Tomuto návratu však bráni zúžené hrdlo kapiláry, v ktorom sa ortuťový stĺpec preruší. V kapiláre teda ostane v najvyššej polohe, do akej vystúpil. Na jeho hornom konci je teda možné odčítať maximálnu teplotu aj potom, čo už je skutočná teplota nižšia. Maximálny teplomer pripravíme na nové meranie striasaním, čím sa spojí prerušený ortuťový stĺpec. Do búdky na stojan sa vkladá v mierne naklonenej polohe.

### **Staničný teplomer**

Staničný teplomer (presný ortuťový teplomer) sa používa na meranie teploty vzduchu v termínoch. Rozsah teplomera zachytáva prakticky celé rozpätie teplôt, ktoré sa u nás vyskytujú (od -35 do 45 °C). Stupnica teplomera je delená po dvoch desatinách stupňa. Je základným typ teplomera na meteorologických staniciach. Je schopný merať teplotu s presnosťou jednej desatiny °C. Priemerná teplota za celý deň ( $t_d$ ) sa vypočíta z termínových meraní o 7.00, 14.00 a 21.00 h podľa vzorca:

$$t_d = \frac{t_7 + t_{14} + 2 * t_{21}}{4} \quad (14)$$

### **ELEKTRICKÉ TEPLOMERY**

Medzi elektrinou a teplotou existujú vzájomné vzťahy, ktoré sa dajú využiť na meranie teplôt. V meteorológii sa používajú dva typy elektrických teplomerov.



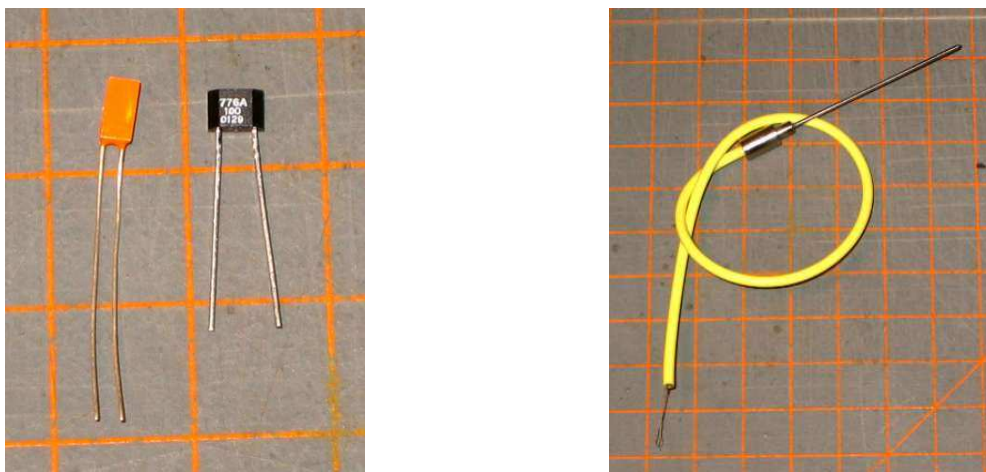
## O odporové teplomery

Princíp spočíva v zmene elektrického odporu vodiča, alebo polovodiča (termistora), pri zmene teploty. Odporom a teplota môžu byť buď v priamom alebo nepriamom (u termistorov) vzťahu. Kovové odporové teplomery sú zložené z vodičov s najvyšším koeficientom odporu, ako sú napr. oceľ, nikel a platina.

Aby sa odpor receptora pohyboval v rozsahu 10 - 100 ohmov zhotovuje sa z drôtu o priemere asi 0,1 mm. Drôt je nutné navíjať na kostičku v tvare cievky tak, aby sa závit navzájom nedotýkali. Pri meraní prechádza okruhom, ktorý je zložený z receptora a galvanometra, elektrický prúd z batérie. Keďže odpor receptora klesá spolu s teplotou, ukazuje galvanometer pri najnižšej teplote, ktorú je schopný tento teplomer zmerať, maximálnu výchylku. So zvyšovaním teploty sa zvyšuje sa aj odpor receptora a galvanometer ukazuje menšie výchylky. Veľmi presné sú platinové a niklové teplomery (Pt 100, Ni 100).

U polovodičových (termistorových) odporových teplomerov sú receptormi tzv. termistory. Termistory majú veľký záporný koeficient odporu. To znamená, že so zvyšovaním teploty sa u nich elektrický odpor znižuje. Zhotovujú sa z kysličníka uraničitého, niklu, mangánu, uránu a pod. Väčšinou v tvare valčekov, perál, atď. Receptory sa zapájajú rovnako ako pri ostatných odporových teplomeroch.

Termistorové teplomery sú obzvlášť vhodné na mikroklimatické merania. Dá sa s nimi dosiahnuť presnosť merania 0,5 až 0,1 °C.



Obr.č.9: Odporové teplomery (vľavo), termoelektrický (vpravo)

## Termoelektrické teplomery

Princíp tejto metódy spočíva v tzv. termoelektrickom jave (priama premena rozdielu teplôt na elektrické napätie). Veľkosť tohto termoelektrického napätia závisí na rozdieli teplôt vodičov a meria sa galvanometrom. Takto vzniknutej jednotke hovoríme termočlánok.

Najčastejšie sa v meteorológii sa používajú termočlánky s elektromotorickou silou 40-50 V na teplotný rozdiel 1 °C. Tieto termočlánky sa skladajú z dvojíc vodičov med'konštantan, mangánkonštantan, nikel-nikelchrom a pod. Malé rozdiely v teplotách vyvolávajú na svorkách galvanometra malé napätie, preto sa termočlánky spájajú do batérií. Napätie je toľkokrát vyššie, koľkokrát viac termočlánkov sa spojí do série.

Termočlánkové teplomery sú presnejšie ako odporové teplomery. Môžu byť upravené na meranie teploty vzduchu aj na meranie teplôt rôznych povrchov.

Elektrické teplomery majú okrem množstva výhod, ako sú napr. možnosť merať teplotu povrchov, vysoká presnosť, malá zotrvačnosť, malé rozmery meracej časti aj možnosť kontinuálneho merania a digitalizácie hodnôt. Tieto hodnoty v digitálnej podobe sa ukladajú do pamäte dataloggera a odkiaľ sa jednoduchým spôsobom prenášajú do počítača. Tento spôsob merania a záznamu umožňuje veľmi rýchle spracovanie veľkého množstva nameraných údajov počítačom a to bez práčneho odčítavania z pásky termografu a následného editovania údajov do počítača. Meracie prístroje umožňujú pripojenie rôznych druhov snímačov rýchlosti vetra, teploty, vlhkosti, uloženie údajov do pamäte a načítanie do počítača.

#### **4.5.2. TEPLOMERY DEFORMAČNÉ**

Pre dlhodobé nepretržité meranie teploty vzduchu sa používajú teplomery využívajúce fyzikálne zmeny tuhých látok vplyvom meniacej sa teploty. Do tejto skupiny patria dva typy teplomerov.

##### **Bimetalické termografy**

U bimetalického termografu sa ako teplomerné teleso obyčajne používa deformačný bimetalický teplomer. Bimetal je na plocho zvarený pásik, ktorý je zložený z dvoch kovových prúžkov s rôznou tepelnou rozťažnosťou. Princíp činnosti spočíva na zmenách krivosti pásika pri zmene okolitej teploty v dôsledku rôznej rozťažnosti oboch kovových prúžkov. Jeden koniec bimetalu je upevnený, druhý koniec potom výchylkou naznačuje mieru teplotných zmien. Zmeny zakrivenia sú prenášané na zapisujúce pero prevodovým mechanizmom.

Registračnou časťou prístroja je valec, ktorý je otáčaný pomocou hodinového stroja. Na valec sa nasadzuje registračná páska, na túto pero zaznamenáva zmenu teploty v priebehu dňa v tvare krivky.

Hlavnou chybou deformačných teplomerov je ich veľká zotrvačnosť. Teplotným zmenám sa prispôbujú značne pomalšie ako ortuťový teplomer, preto ich presnosť nie je viac ako 0,3 až 0,5 °C.

Termograf je chránený proti ožarovaniu prístroja, pred zrážkami a poškodením umiestnením v meteorologickej budke.

## Manometrické teplomery a termografy

Ich receptormi sú kovové rúrky naplnené teplomernou kvapalinou, ako môže byť napr. lieh, ortuť, kreozot a pod. Najčastejšie používaná je tzv. Bourdonová rúrka so šošovkovitým prierezom a kruhovitým zakrivením do oblúka alebo špirály. Oblúk alebo špirála alebo sa so zmenami teploty deformuje, pretože kov rúrky má menší koeficient tepelnej rozťažnosti ako teplomerná kvapalina. Vzniknuté pohyby prenáša na stupnicu, alebo registračnú pásku prevodový mechanizmus. Tieto sú vhodné hlavne na diaľkové meranie teplôt. V tom prípade sú tlakové zmeny sprevádzajúce zmenu teploty v receptore prenášané pružnou kovovou kapilárou do indikátora.

Manometrické diaľkové teplomery a termografy sa používajú vo veľkej miere na meranie teplôt vody a pôdy, ale môžu byť upravené aj ako psychrometre alebo psychrografy (slúžiace na meranie vlhkosti vzduchu).

### 4.5.3. BEZKONTAKTNÉ TEPLOMERY - INFRATERMOMETRE

Tieto teplomery využívajú infratermometriu, ktorá je založená na meraní infračerveného žiarenia vyžarovaného z aktívnych povrchov. Bezkontaktné meranie povrchovej teploty objektov umožňuje prejsť od meraní bodových (pomocou termočlánkov upevnených napr. na stojanoch) na plošné merania. Infratermometer je opticko-elektrická sústava. Prístroj meria integrovanú hodnotu žiarenia emitovaného objektom, v spektrálnej oblasti 8-14 alebo 10,5-12,5  $\mu\text{m}$ . Pokroky v elektronike dovolili konštrukciu malých prístrojov tvare pištole, ktoré sú ľahko prenosné a dajú sa použiť pri meraní vo vonkajších podmienkach. Okrem infratermometrov sa na bezkontaktné určovanie teploty používajú aj multispektrálne kamery, umiestnené na vrtuľníkoch, lietadlách, alebo družiciach.



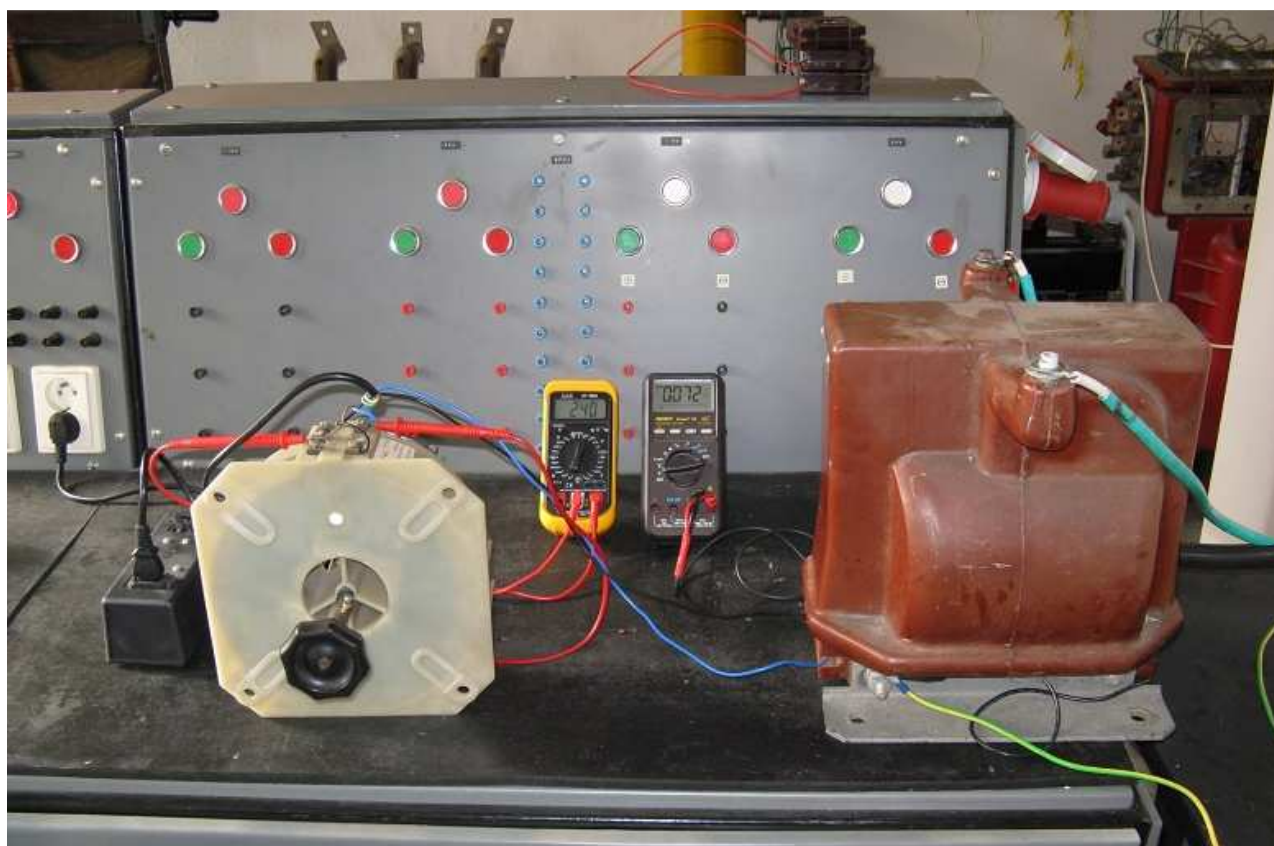
Obr.č.10: Infratermometer

Viac informácií vid'. [9]

## 5. VLASTNÁ EXPERIMENTÁLNA ČASŤ PRÁCE

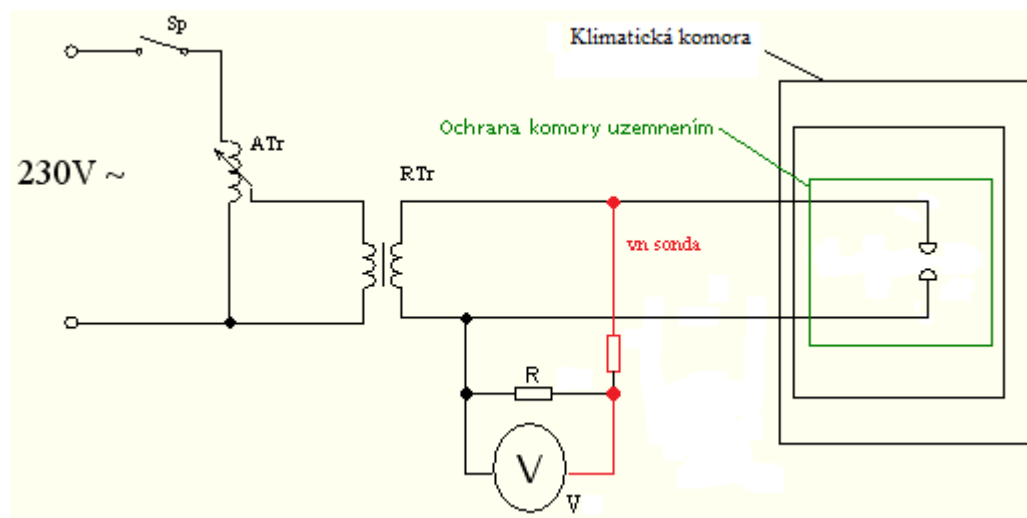
Úlohou tejto časti práce bolo experimentálne zisťovanie prieražnej pevnosti vzduchu na medených guľových elektródach, v konštantnej vzdialenosti 7 milimetrov, pri rôznych teplotách a vlhkostiach vzduchu. Vlastné experimentálne meranie prebieha v klimateckej komore pri teplotách v rozsahu -20 až 95 °C a vlhkostiach v rozsahu 20 až 95%.

**Meracie pracovisko:**



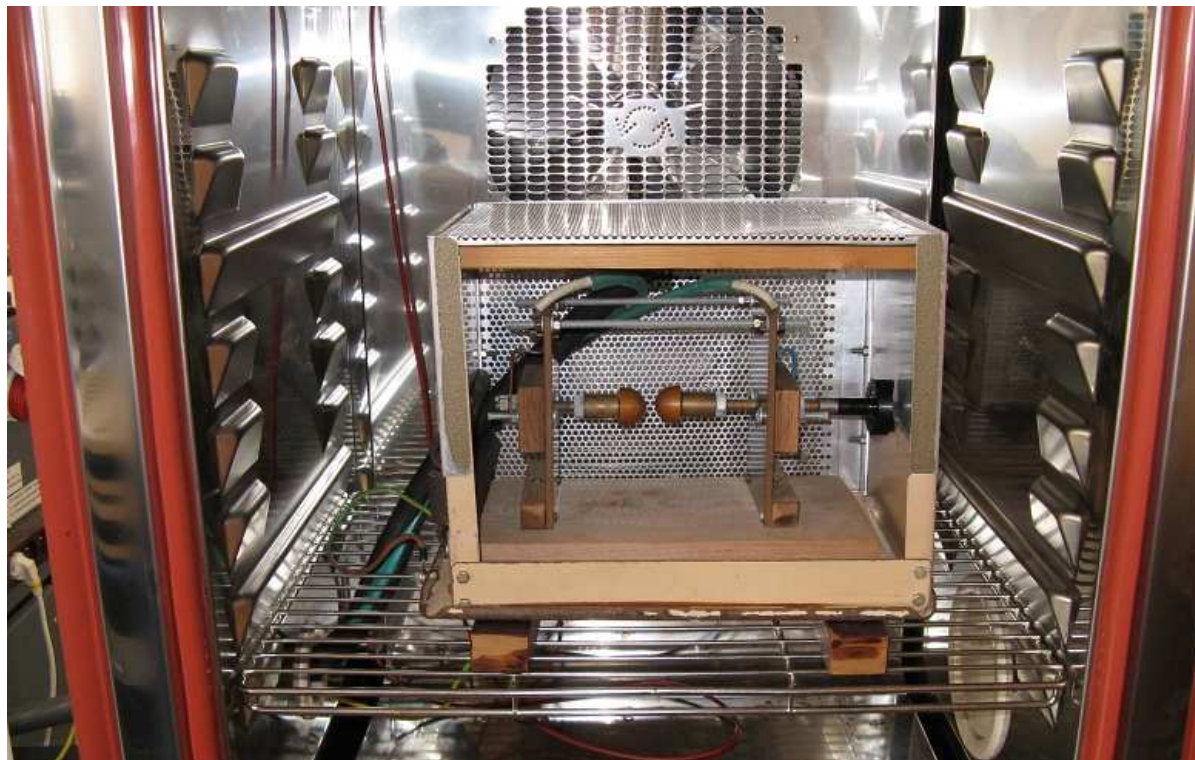
*Obr.č.11: Meracie pracovisko*

**Schéma zapojenia:**



*Obr.č.12: Schéma zapojenia*

**Umiestnenie iskriška v klimatickej komore:**



*Obr.č.13: Iskriško v klimatickej komore*



## 5.1 POUŽITÉ PRÍSTROJE:

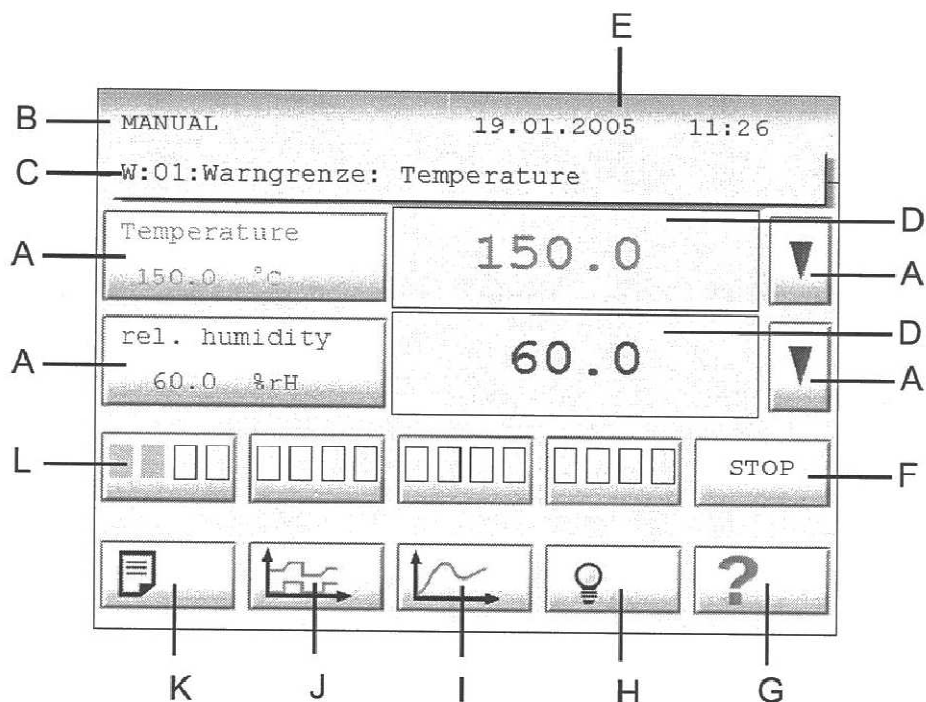
### Klimatická komora:

- menovité napätie: 3/N/PE AC 400V $\pm$  10% 50 Hz
- Menovitý výkon [ kW ]: 4,1
- stupeň elektrického krytia: IP 54
- potrebný tlak vody [ bar ]: 2,5-6
- teplota prívodu [°C]: 12-28
- rozsah meraných teplôt [°C]: - 45 až 180
- rozsah meraných vlhkostí 10 až 95%
- možnosť regulácie vlhkosti pri teplotách 10 až 95 °C



*Obr.č.14: Klimatická komora*

## Základná ponuka klimatickej komory:



Obr.č.15: Ponuka klimatickej komory

**A – vľavo:** Zobrazenie regulovanej veličiny a nastavená požadovaná hodnota; vyvolanie vstupnej ponuky požadovanej hodnoty

**vpravo:** Voľba regulovanej veličiny

**B** – Zobrazenie prevádzkového režimu

**C** – Zobrazenie chybových hlásení

**D** – Skutočné hodnoty regulovanej veličiny

**E** – Zobrazenie data a času

**F** – Spustenie/zastavenie skúšky; digitálny kanál 1 sa zapne automaticky

**G** – Menu nápovedy

**H** – Osvetlenie skúšobného priestoru

**I** – Vyvolanie grafickej ponuky

**J** – Vyvolanie ponuky automatiky

**K** – Ponuka s ďalšími funkciami

**L** – Vyvolanie grafickej ponuky

	<p><b>Autotransformátor ATr</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• prúd 20 A</li> <li>• napätie 220/250 V</li> <li>• frekvencia 50 – 60 Hz</li> </ul>
	<p><b>Vysokonapäťová sonda</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• deliaci pomer: 1:1000</li> <li>• vstupná impedancia: 1000 MΩ</li> <li>• výstupná impedancia: 1,1 MΩ</li> <li>• max. prevádzkové napätie: DC 40kV</li> <li>• prevádzková vlhkosť menej ako 80% RH</li> <li>• prevádzková teplota: 0 – 50 °C</li> </ul>
	<p><b>Transformátor: D 225 312308</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Made in Czechoslovakia</li> <li>• Rok výroby 1978</li> <li>• Prevod 22000/100 V</li> <li>• Frekvencia 50 Hz</li> <li>• ČSN 351360</li> </ul>
	<p><b>Multimeter UNITEST HEXAGON 320 BEHA:</b></p> <p>Prevod je tvorený vn sondou, preto sa 1kV zobrazí na meracom prístroji ako 1V</p>

Obr.č.16: Používané prístroje



## 5.2. POSTUP MERANIA

1. Na iskrisku nastavíme konštantnú vzdialenosť (7 mm) medzi elektródami a umiestnime ho do komory.
2. Na klimatickej komore nastavíme požadovanú teplotu a vlhkosť.
3. Po ustálení požadovanej teploty a vlhkosti pomocou autotransformátora pomaly zvyšujeme napätie približne po 100 V a sledujeme jeho hodnotu na multimetri.
4. V čase prirazu odčítame hodnotu napätia na multimetri. Po určitej dobe bolo meranie opakované a to celkom päť krát, za účelom dosiahnutia štatistického vyjadrenia reálnej hodnoty prirazného napätia a pevnosti vzduchu pre nastavenú vlhkosť.
5. Opakujeme body 2, 3 a 4, pre ďalšie stupne teploty a vlhkosti vzduchu.

Tento postup merania priraznej pevnosti vzduchu v klimatickej komore bol prevedený pre nasledujúce hodnoty teplôt a vlhkosti.

Tab.č.5: Hodnoty meraných teplôt a vlhkosti

Rel. vlh. vzduchu [%]	10	20	40	60	80	90
Teplota [°C]						
95	?	✓	✓	✓	✓	?
80	?	✓	✓	✓	✓	?
60	?	✓	✓	✓	✓	?
40	?	✓	✓	✓	✓	?
30	?	✓	✓	✓	✓	?
20	?	✓	✓	✓	✓	✓
5	✓	?	?	?	?	✓
0	✓	?	?	?	?	✓
-5	✓	?	?	?	?	✓
-20	✓	?	?	?	?	✓

Z dôvodu obmedzenej možnosti merania a regulácie vlhkosti v nižších hodnotách teploty (pod 10°C) bola pri týchto teplotách hodnota relatívnej vlhkosti regulovaná experimentálne. Komora bola najskôr nastavená na teplotu 10 °C a relatívnu vlhkosť vzduchu 10 %, keď sa hodnota ustálila, nastavili sme komoru postupne na skupinu nižších hodnôt teplôt a uskutočnili sme meranie. Ďalej prebehlo obdobné meranie s nastavenou teplotou taktiež 10 °C, ale relatívnou vlhkosťou 90 %. Výsledky sú podľa možnosti priameho ovplyvnenia vlhkosti rozdelené do dvoch skupín.

Pri relatívnej vlhkosti vzduchu 95 % sa podarilo zmerať priernú pevnosť vzduchu len pri teplote 20°C. Pri vyšších teplotách nastal viackrát povrchový prieraz po nahromadených kvapkách na konštrukcii iskrika v dĺžke cca 6 cm (obr.č.13). Z toho dôvodu nebolo meranie pri tejto hodnote relat. vlhkosti viac uskutočňované.

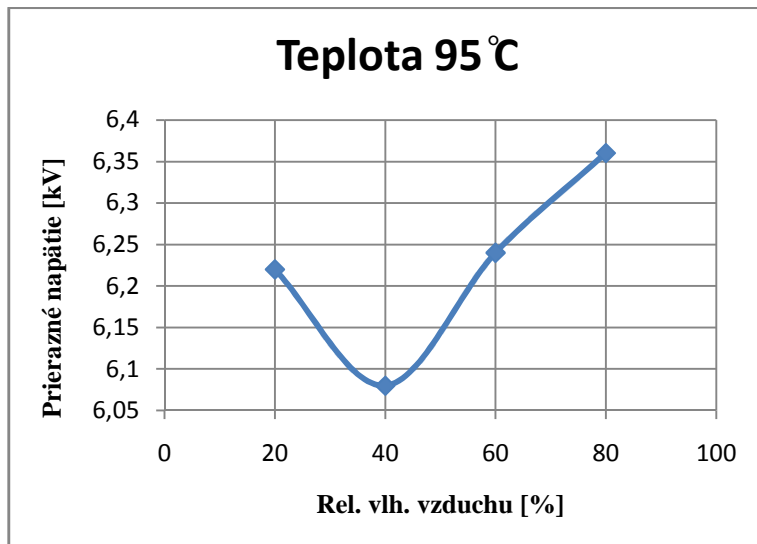


*Obr.č.17: Povrchový prieraz*

### 5.3. HODNOTY PRIERAZ. NAPÄTIA PRI TEPLOTÁCH S MOŽNOSŤOU REGULÁCIE VLHKOSTI:

Tab.č.6: Hodnoty pri teplote 95 °C

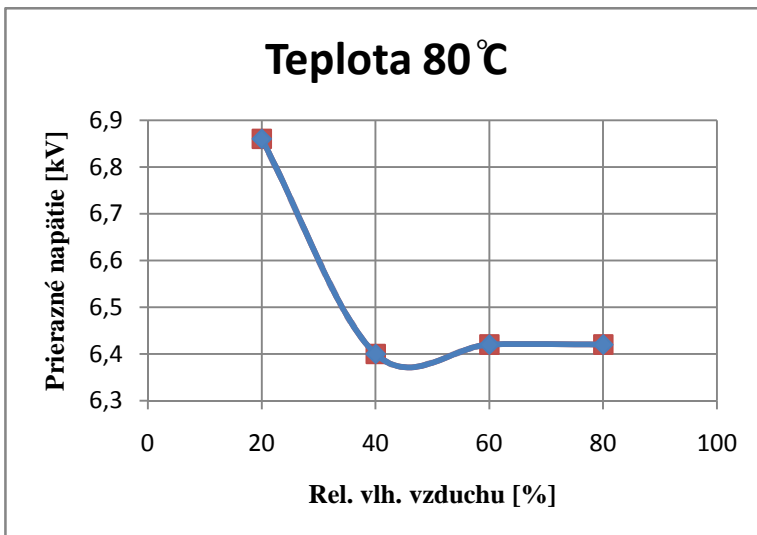
Rel. vlhkosť vzduchu [%]	20	40	60	80
Up1 [kV]	6,2	6,0	6,2	6,4
Up2 [kV]	6,2	6,1	6,3	6,4
Up3 [kV]	6,1	6,1	6,2	6,4
Up4 [kV]	6,3	6,1	6,2	6,3
Up5 [kV]	6,3	6,1	6,3	6,3
Upr [kV]	6,22	6,08	6,24	6,36



Obr.č.18: Graf z hodnôt pri teplote 95 °C

Tab.č.7: Hodnoty pri teplote 80 °C

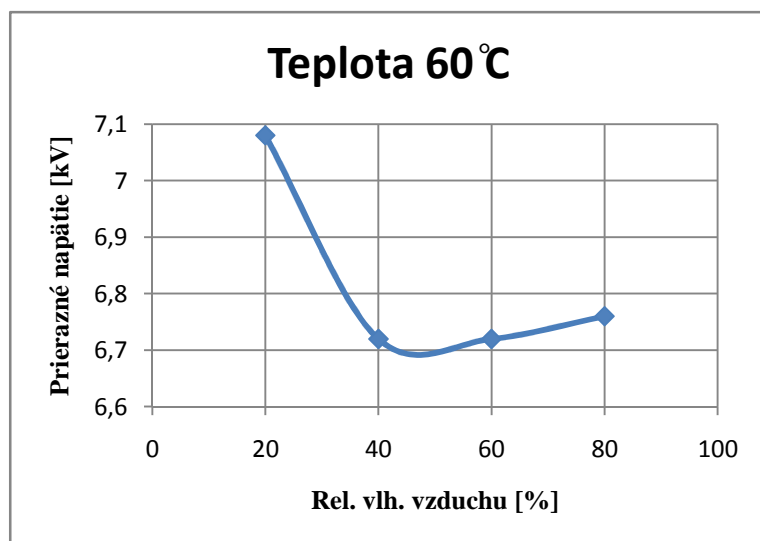
Rel. vlhkosť vzduchu [%]	20	40	60	80
Up1 [kV]	6,8	6,3	6,4	6,4
Up2 [kV]	6,9	6,4	6,4	6,5
Up3 [kV]	6,9	6,5	6,4	6,4
Up4 [kV]	6,7	6,4	6,5	6,5
Up5 [kV]	7,0	6,4	6,4	6,3
Upr [kV]	6,86	6,40	6,42	6,42



Obr.č.19: Graf z hodnôt pri teplote 80 °C

Tab.č.8: Hodnoty pri teplote 60 °C

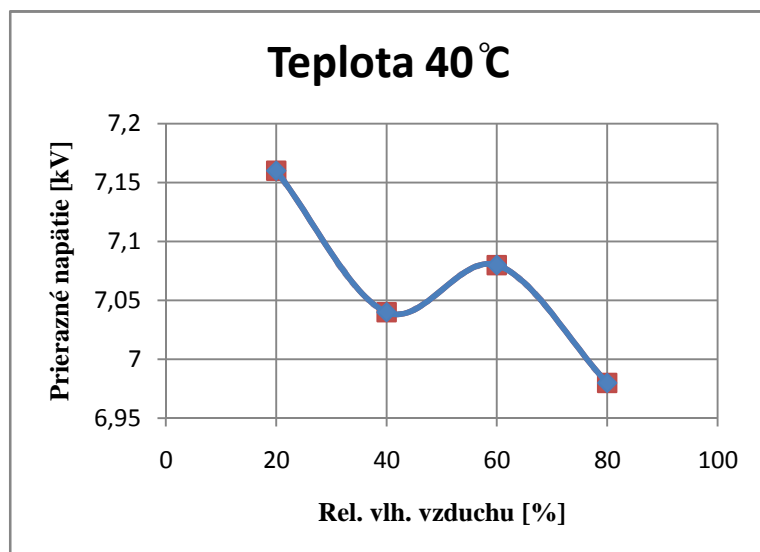
Rel. vlhkosť vzduchu [%]	20	40	60	80
Up1 [kV]	7,2	7,0	7,2	6,9
Up2 [kV]	7,3	7,1	7,0	7,0
Up3 [kV]	7,2	7,2	7,1	6,9
Up4 [kV]	7,2	7,0	7,0	7,1
Up5 [kV]	6,9	6,9	7,1	7,0
Upr [kV]	7,16	7,04	7,08	6,98



Obr.č.20: Graf z hodnôt pri teplote 60 °C

Tab.č.9: Hodnoty pri teplote 40 °C

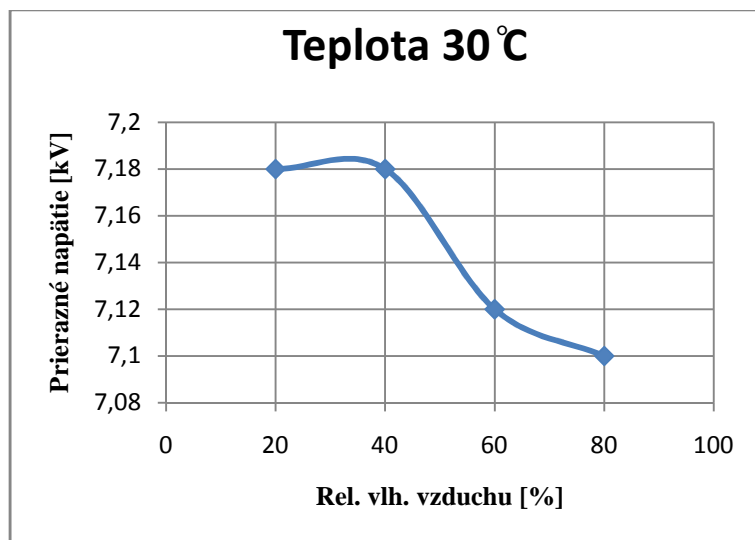
Rel. vlhkosť vzduchu [%]	20	40	60	80
Up1 [kV]	7,2	6,6	6,6	6,8
Up2 [kV]	7,0	6,8	6,7	6,8
Up3 [kV]	7,1	6,6	6,7	6,7
Up4 [kV]	7,1	6,8	6,8	6,7
Up5 [kV]	7,0	6,8	6,8	6,8
Upr [kV]	7,08	6,72	6,72	6,76



Obr.č.21: Graf z hodnôt pri teplote 40 °C

Tab.č.10: Hodnoty pri teplote 30 °C

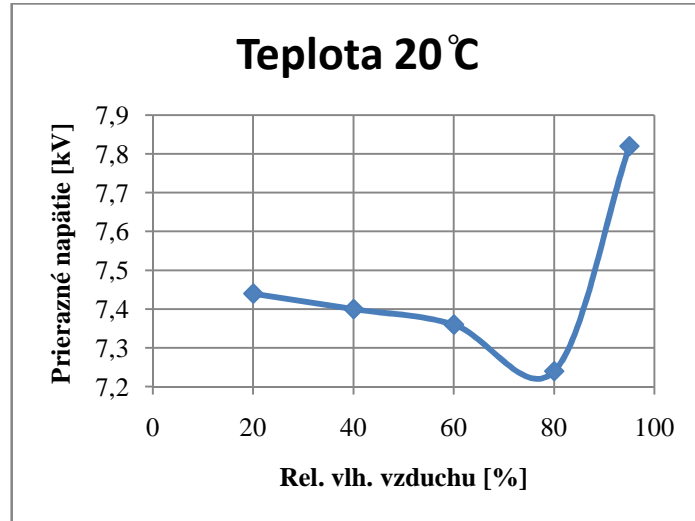
Rel.vlh.vzduchu [%]	20	40	60	80
Up1 [kV]	7,3	7,2	7,2	7,0
Up2 [kV]	7,2	7,2	7,1	7,1
Up3 [kV]	7,1	7,2	7,0	7,1
Up4 [kV]	7,1	7,1	7,1	7,2
Up5 [kV]	7,2	7,2	7,2	7,1
Upr [kV]	7,18	7,18	7,12	7,1



Obr.č.22: Graf z hodnôt pri teplote 30 °C

Tab.č.11: Hodnoty pri teplote 20 °C

Rel.vlh.vzduchu [%]	20	40	60	80	95
Up1 [kV]	7,5	7,3	7,4	7,2	7,7
Up2 [kV]	7,3	7,4	7,3	7,3	7,8
Up3 [kV]	7,5	7,3	7,4	7,2	8,0
Up4 [kV]	7,5	7,5	7,4	7,2	7,9
Up5 [kV]	7,4	7,5	7,3	7,3	7,7
Upr [kV]	7,44	7,4	7,36	7,24	7,82



Obr.č.23: Graf z hodnôt pri teplote 20 °C

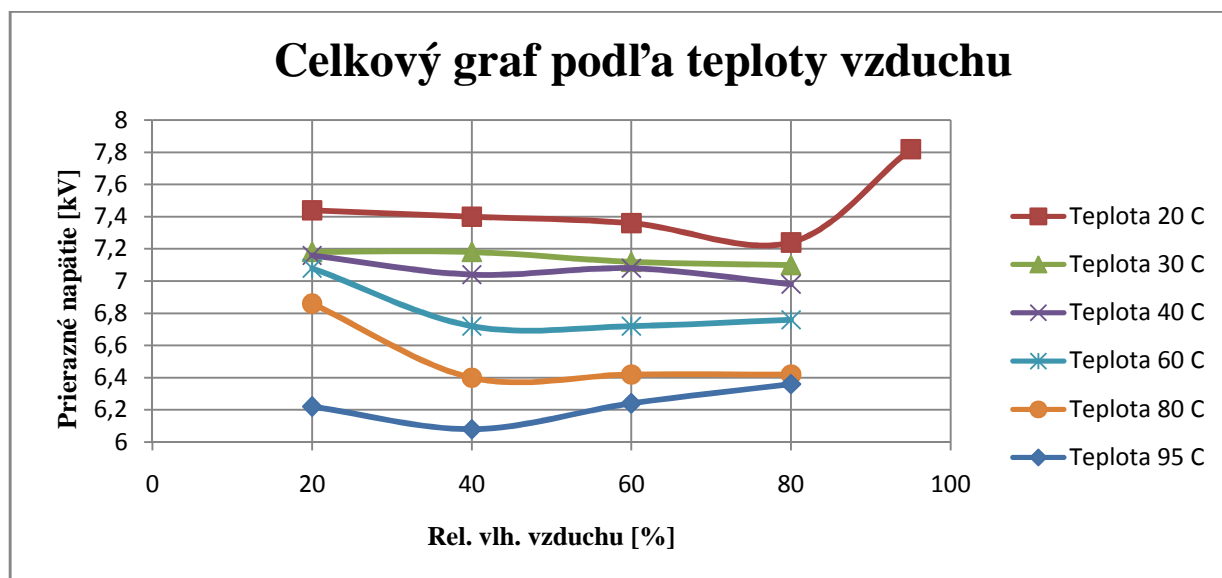
Teplota 20 °C bola jediná teplota, pri ktorej sa podarilo zmerať priernú pevnosť vzduchu aj pri relatívnej vlhkosti vzduchu 95 %.

Výsledné štatistické vyjadrenie reálnej hodnoty prierného napätia a pevnosti vzduchu pre jednotlivé vlhkosti a teploty.

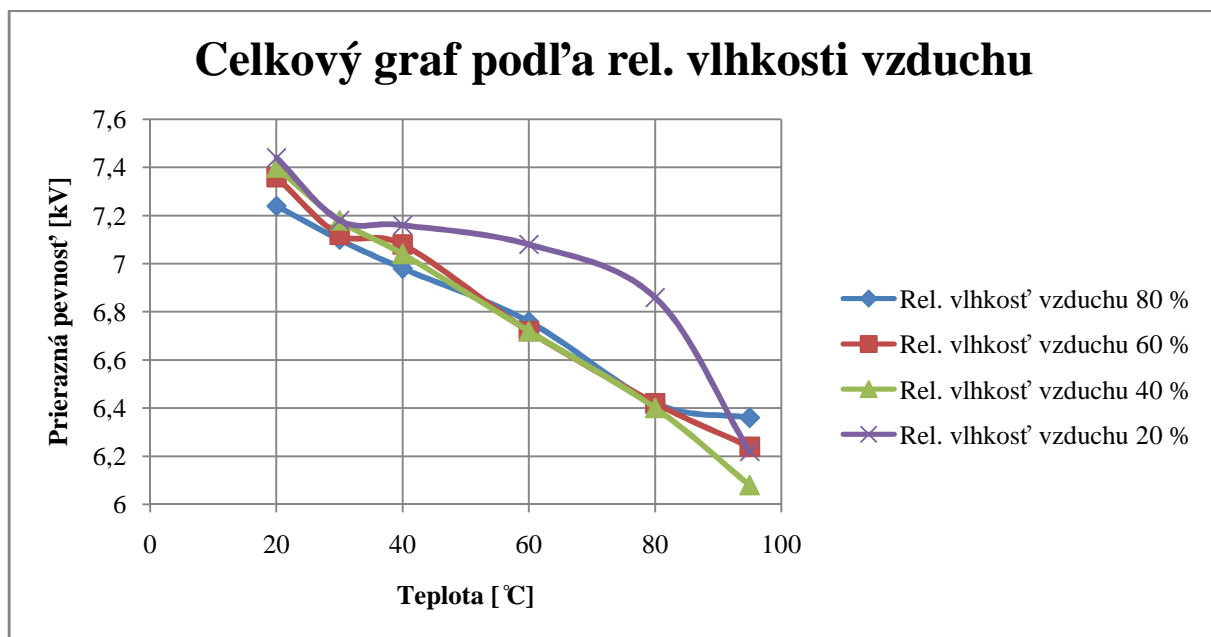
Tab. č.12: Stredné hodnoty prierných napätí pre jednotlivé teploty a vlhkosti

Rel. vlh. vzduchu [%]	20	40	60	80
Teplota [°C]				
95	6,36	6,24	6,08	6,22
80	6,42	6,42	6,4	6,86
60	6,76	6,72	6,72	7,08
40	6,98	7,08	7,04	7,16
30	7,1	7,12	7,18	7,18
20	7,24	7,36	7,4	7,44

### 5.3.1. VZÁJOMNE POROVNANIE VÝSLEDKOV PRI TEPLOTÁCH S MOŽNOSŤOU REGULÁCIE VLHKOSTI.

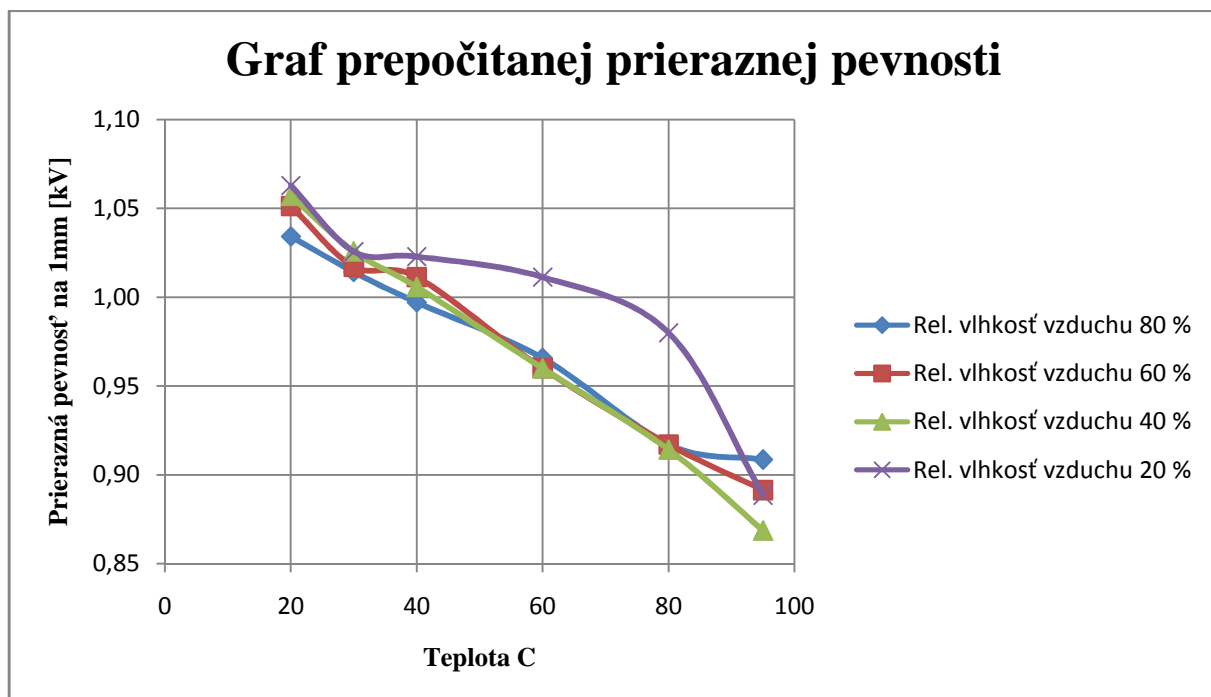


Obr.č.24: Celkový graf podľa teploty vzduchu



Obr.č.25: Celkový graf podľa relatívnej vlhkosti vzduchu

Z nameraných dát bola ďalej stanovená prierezná pevnosť vzduchu pre jednotlivé teploty a vlhkosti. Tato elektrická pevnosť bola stanovená lineárnym delením, z hodnoty zmeranej veľkosti prierazného napätia, na vzdialenosť elektród. Výsledné hodnoty sú uvedené v nasledujúcom grafe.

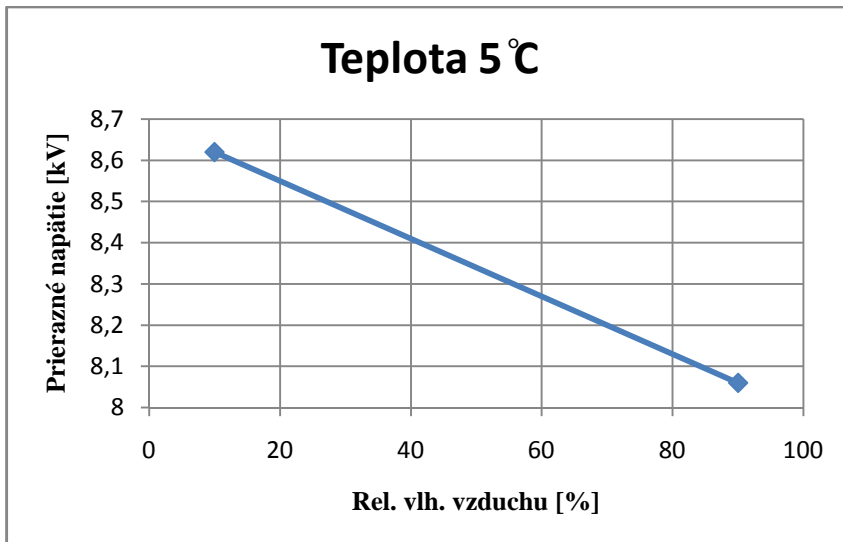


Obr.č.26: Graf prepočítanej prieraznej pevnosti

## 5.4. HODNOTY PRIERAZNÉHO NAPÄTIA PRI TEPLOTÁCH BEZ MOŽNOSTI REGULÁCIE VLHKOSTI:

Tab.č.13: Hodnoty pri teplote 5 °C

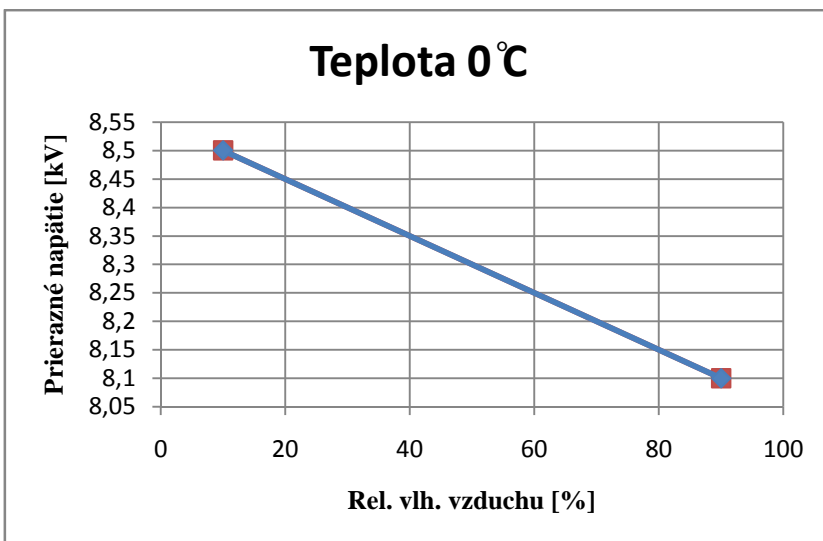
Rel. vlhkosť vzduchu [%]	10	90
Up1 [kV]	8,7	8,3
Up2 [kV]	8,8	8,3
Up3 [kV]	8,7	8,2
Up4 [kV]	8,5	8,1
Up5 [kV]	8,7	8,2
Upr [kV]	8,68	8,22



Obr.č.27: Graf z hodnôt pri teplote 5 °C

Tab.č.14: Hodnoty pri teplote 0 °C

Rel. vlhkosť vzduchu [%]	10	90
Up1 [kV]	8,7	8,2
Up2 [kV]	8,5	8,0
Up3 [kV]	8,6	7,9
Up4 [kV]	8,7	8,0
Up5 [kV]	8,6	8,2
Upr [kV]	8,62	8,06

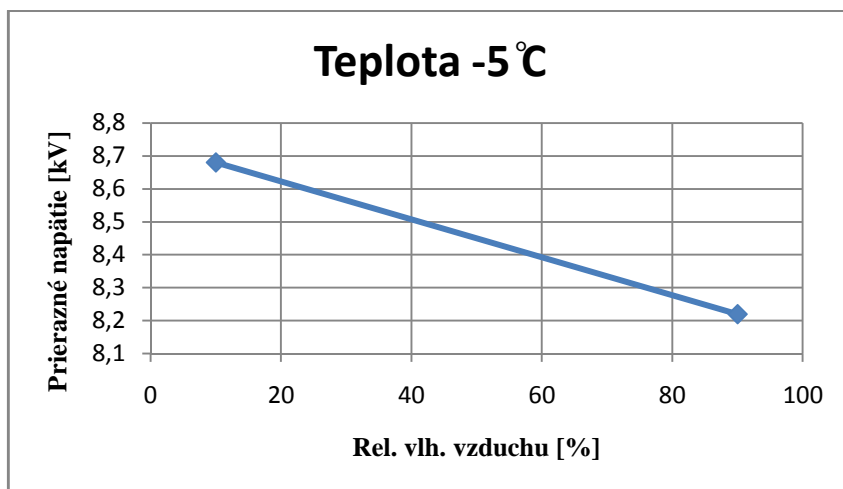


Obr.č.28: Graf z hodnôt pri teplote 0 °C



Tab.č.15: Hodnoty pri teplote -5 °C

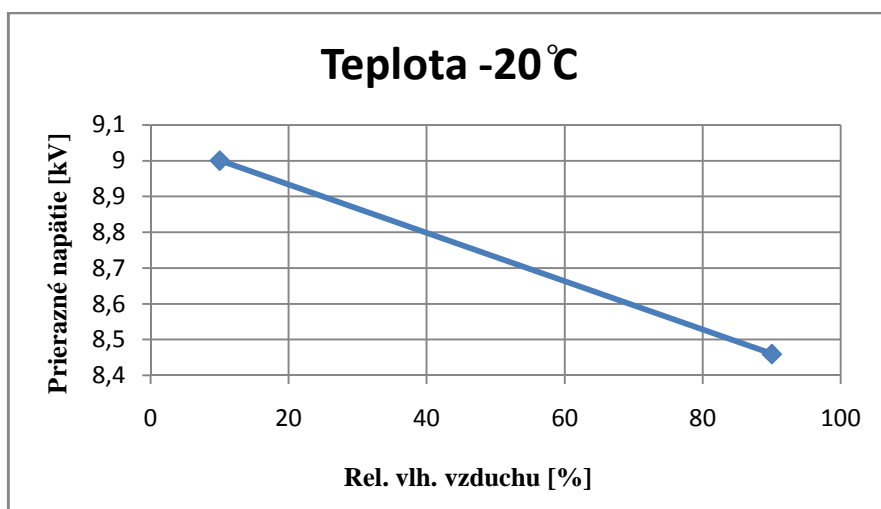
Rel. vlhkosť vzduchu [%]	10	90
Up1 [kV]	9,0	8,4
Up2 [kV]	9,1	8,5
Up3 [kV]	9,0	8,5
Up4 [kV]	8,9	8,5
Up5 [kV]	9,0	8,4
Upr [kV]	9,0	8,46



Obr.č.29: Graf z hodnôt pri teplote -5 °C

Tab.č.16: Hodnoty pri teplote -20 °C

Rel. vlhkosť vzduchu [%]	10	90
Up1 [kV]	8,6	8,1
Up2 [kV]	8,5	8,1
Up3 [kV]	8,4	7,8
Up4 [kV]	8,5	8,3
Up5 [kV]	8,5	8,2
Upr [kV]	8,5	8,10



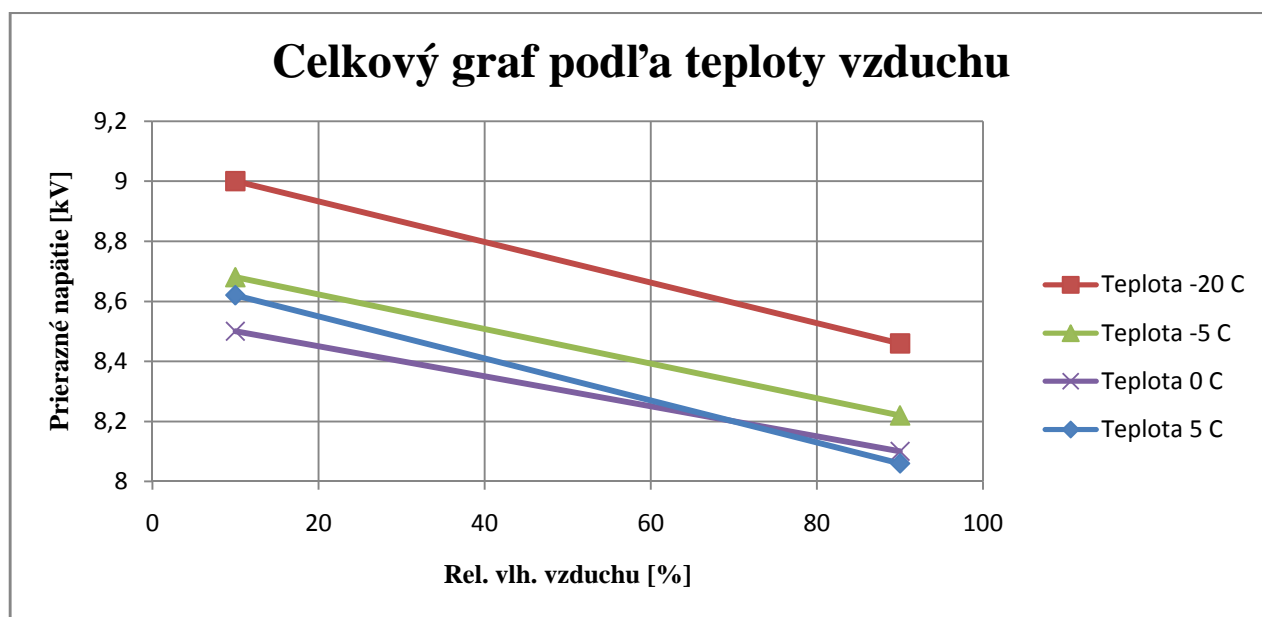
Obr.č.30: Graf z hodnôt pri teplote -20 °C

Výsledné štatistické vyjadrenie reálnej hodnoty prierného napätia a pevnosti vzduchu pre jednotlivé vlhkosti a teploty.

Tab. č.17: Stredné hodnoty prierných napätí pre jednotlivé teploty a vlhkosti

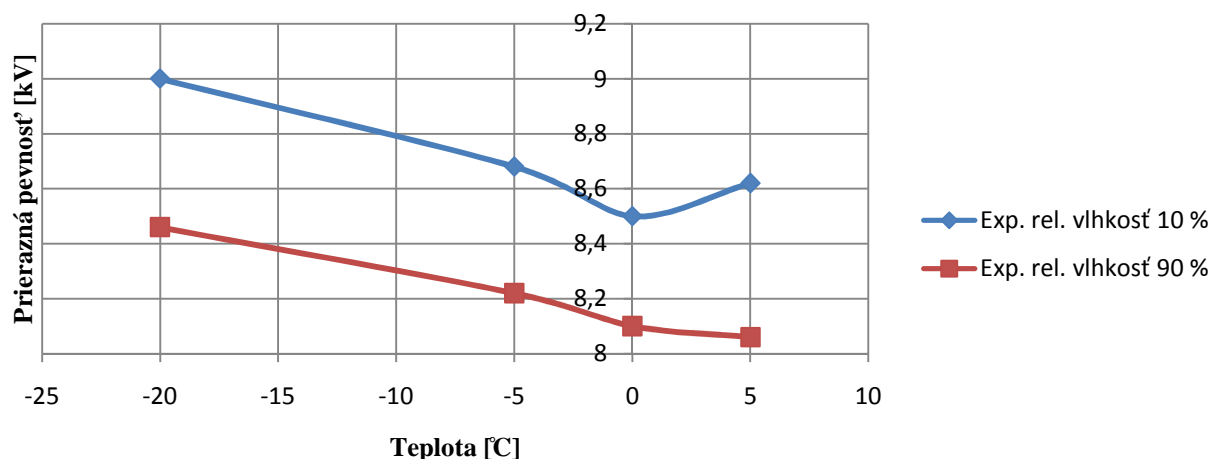
Rel. vlh. vzduchu [%]	10	90
Teplota [°C]		
5	8,62	8,06
0	8,5	8,1
-5	8,68	8,22
-20	9	8,46

#### 5.4.1. VZÁJOMNE POROVNANIE VÝSLEDKOV PRI TEPLOTÁCH BEZ MOŽNOSTI REGULÁCIE VLHKOSTI.



Obr.č.31: Celkový graf podľa teploty vzduchu

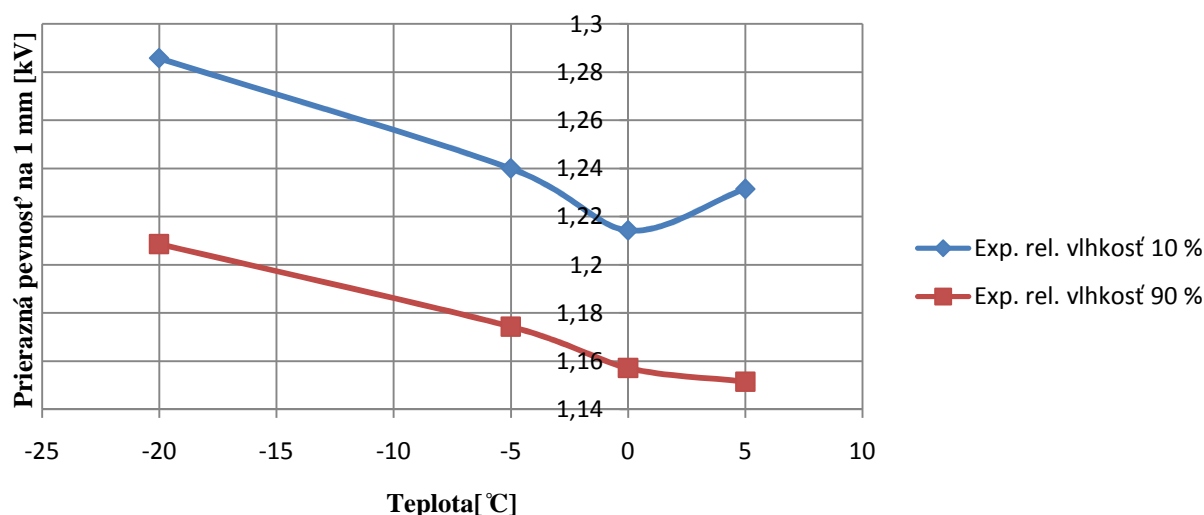
## Celkový graf podľa rel. vlhkosti vzduchu



Obr.č.32: Celkový graf podľa relatívnej vlhkosti vzduchu

Z nameraných dát bola ďalej stanovená prierazná pevnosť vzduchu pre jednotlivé teploty a vlhkosti. Tato elektrická pevnosť bola stanovená lineárnym delením, z hodnoty zmeranej veľkosti prierazného napätia, na vzdialenosť elektród. Výsledné hodnoty sú uvedené v nasledujúcom grafe.

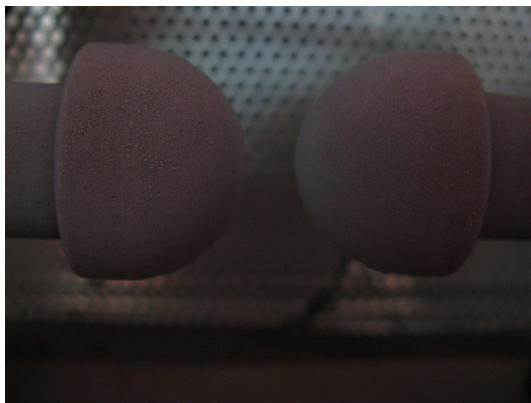
## Graf prepočítanej prieraznej pevnosti



Obr.č.33: Graf prepočítanej prieraznej pevnosti

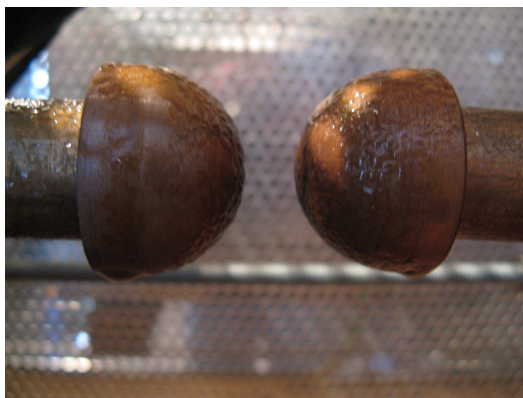
## 5.5. ZAUJÍMAVOSTI

Na obr.č.34 môžeme vidieť, námraza na elektródach, ktorá vznikla po otvorení klimateckej komory pri teplote  $-20^{\circ}\text{C}$ .



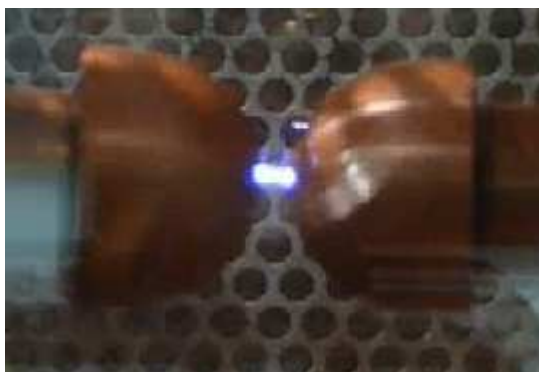
*Obr.č.34: Námraza na elektródach pri teplote  $-20^{\circ}\text{C}$*

Na obr.č.35 môžeme vidieť, ako vlhkosť zo vzduchu kondenzovala na kvapky vody na elektródach, pri relatívnej vlhkosti vzduchu vyššej ako 80 %.



*Obr.č.35: Vyzrážané kvapky vody na elektródach pri relatívnej vlhkosti nad 80 %*

Na obr.č.36 môžeme vidieť, vzniknutý elektrický oblúk medzi elektródami.



*Obr.č.36: Elektrický oblúk medzi elektródami*

## ZÁVER:

Hlavným prínosom tejto práce bolo praktické overenie prieražnej pevnosti vzduchu a zistenie vplyvu teploty a vlhkosti na veľkosť prieražného napätia. Prieražná pevnosť vzduchu bola meraná v klimateckej komore na guľových, medených elektródach v konštantnej vzdialenosti 7 mm, v rozsahoch teplôt -20 až 95 °C a vlhkostiach v rozsahu 10 až 95 %. Pri teplotách nižších ako 10 °C nebolo možné komorou priamo regulovať a merať vlhkosť vzduchu, z toho dôvodu bola vlhkosť regulovaná experimentálne. Najskôr bola nastavená relatívna vlhkosť vzduchu na 95 % pri teplote 10 °C, následne bola teplota znížená na sériu nižších hodnôt a bolo prevedené meranie. Ďalšie meranie prebiehalo obdobne, ale s nastavenou relatívnou vlhkosťou vzduchu 10 %.

Pri relatívnej vlhkosti vzduchu 95 % sa podarilo zmerať prieražnú pevnosť vzduchu pre teploty s možnosťou priamej regulácie relatívnej vlhkosti len pri teplote 20 °C. Pri vyšších teplotách nastal viackrát povrchový prieraž po nahromadených kvapkách na konštrukcii iskriška v dĺžke cca 6 cm (obr.č.13). Z toho dôvodu nebolo meranie pri tejto hodnote relatívnej vlhkosti viac uskutočňované.

Výsledky jednotlivých meraní sú uvedené v tabuľkách a grafoch jednotlivých kapitol tejto práce. Z výsledkov meraní môžeme vidieť, že sa prieražná pevnosť vzduchu v týchto prípadoch pohybovala v rozmedzí 6,08 až 9 kV na vzdialenosť 7 mm. Po prepočítaní lineárnym delením dôjdeme k hodnotám cca 0,87 až 1,29 kV. Najvyššia hodnota prieražného napätia bola nameraná pri najnižšej teplote (20 °C) a najnižšej vlhkosti (10 %). Najnižšia prieražná pevnosť bola nameraná pri teplote 95 °C a relatívnej vlhkosti 60 %.

Dosiahnutie týchto výsledkov bolo časovo náročné a to hlavne z dôvodu samotného merania v klimateckej komore, v ktorej dosiahnutie jednotlivých požadovaných hodnôt teplôt a relatívnych vlhkostí vzduchu trvalo značný čas.

## POUŽITÁ LITERATÚRA:

- [1] Marton, K.: Elektrotechnické materiály, ALFA Bratislava, 1979
- [2] Hassdenteufel, J.: Elektrotechnické materiály, Alfa, Bratislava, 1971
- [3] Marek, M.: Degradáční procesy elektrotechnických systému, sylaby
- [4] Blahník, R.: *Vlhkost vzduchu*. Státní pedagogické nakladatelství SPN Praha, 1964
- [5] Zehnula, K.: Snímače neelektrických veličín, SNTL, Praha, 1983
- [6] Horák, Zd., Krupka, Fr., Šindelář, V.: Technická fyzika, SNTL, Praha, 1961
- [7] Šanderová, V., Kracík, J.: Fyzika, SNTL, Praha, 1989
- [8] Krempaský, J.: Fyzika, Alfa, Bratislava, 1982
- [9] Ing. Katarína Střelcová, PhD., Doc. Ing. Jaroslav Škvarenina, CSc.: Bioklimatológia a meteorológia, Zvolen, 2004
- [10] Ing. Otto Havelka, CSc.: Stavba elektrických přístrojů I, VUT Brno, 1988